

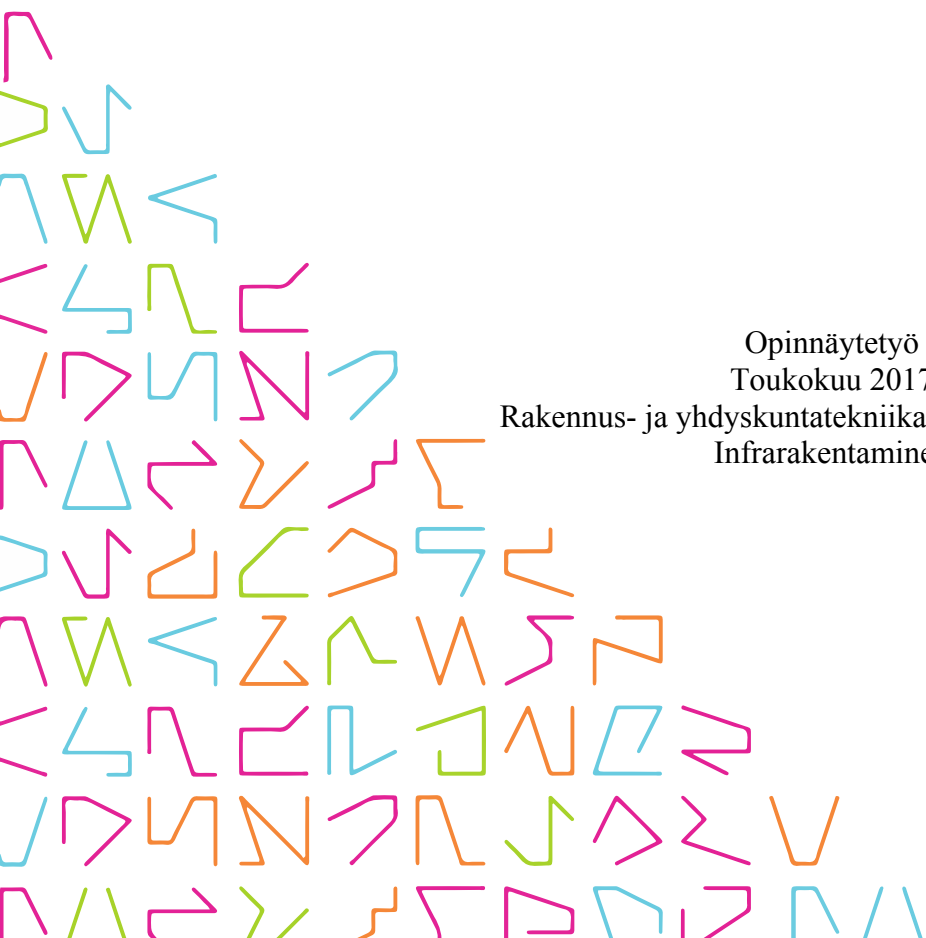


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

MAAPERÄMALLIEN LUOTETTAVUUS

Lassi Tarri

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma
Infrarakentaminen



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma
Infrarakentaminen

TARRI LASSI:
Maaperämallien luotettavuus

Opinnäytetyö 49 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2017

Maaperä- ja pohjatutkimuksiin liittyvä tieto esitetään tyypillisesti yksinkertaistettuina maaperämalleina, jotka toimivat lähtötietona suunnittelulle ja mahdollistavat tiedon havainnollistamisen. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää millaisia menetelmiä maaperää kuvaavien kolmiulotteisten mallien laadinnassa käytetään ja mitkä tekijät vaikuttavat niiden luotettavuuteen. Lisäksi tavoitteena oli tilastollisen tarkastelun avulla tutkia miten havaintopisteiden välimatka vaikuttaa pintamallien luotettavuuteen sekä selvittää aineistona käytetyn laserkeilatun kallionpinnan spatiaalinen vaihtelu. Tutkimuksessa käytettiin Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa, jota luokiteltiin ja käsiteltiin mallintamalla sekä paikkatietoanalyysien avulla. Luotettavuutta ja spatiaalista vaihtelua kuvattiin aineistoista muodostetuilla tilastollisilla tunnusluvuilla ja kuvaajilla.

Tutkimuksessa suoritettiin kaikki analyysit sekä kolmioverkkomalleilla että ruutuverkkoon interpoloiduilla pintamalleilla. Luotettavuuden kannalta näiden menetelmien välille ei tutkimuksessa pystytty osoittamaan selvää eroa. Tutkimuksen mukaan havaintopisteiden välimatkalla ei ollut juurikaan vaikutusta referenssipinnan ja vertailupinnan välisten erojen keskiarvoon. Tuloksista kuitenkin ilmeni, että keskiarvon vaihteluväli sekä keskiarvon 95 %:n luottamusväli olivat noin neljä kertaa pienempiä, kun havaintopisteväliä tihennettiin 40 metristä 20 metriin tai 10 metristä 5 metriin. Tutkimusaineiston osalta kalliopinnan spatiaalista vaihtelua kuvattiin tutkimuksessa kalliopinnan korkeuden muutoksena suhteessa etäisyyteen. Tulosten mukaan muutosta oli mahdollista kuvata lineaarisesti siten, että kallionpinnan korkeuden keskimääräinen muutos suhteessa etäisyyteen oli noin 1:10.

Tutkimustulosten perusteella keskihajonta ja luottamusväli osoittautuivat keskiarvoa paremmiksi tavoiksi kuvata pintamallien luotettavuutta. Koska aineisto oli laaja, kalliopinnan spatiaalisen vaihtelun tarkastelun ei todettu antavan kovinkaan paljon tietoa kuvaavasta olosuhteista yksittäisen kohteen osalta. Tietoa voi olla kuitenkin mahdollista käyttää esimerkiksi kalliopinnan luottamusvälin arviointiin ilman geostatististen menetelmien käyttämistä. Vaikka tutkimuksessa ei ruutuverkkoon interpoloitujen pintamallien avulla pystytty tuottamaan kolmioverkkoa luotettavampaa kuvausta mallinnettavasta pinnasta, voisi interpolointimenetelmien käytöstä olla hyötyä myös perinteisissä suunnitteluohjelmistoissa. Kolmioverkkomalleja olisi esimerkiksi mahdollista rajata geostatistisilla menetelmillä saadun luotettavuustiedon avulla. Interpolointimenetelmien käyttö mahdollistaisi myös maaperän ominaisuustietojen sisällyttämisen maaperän rakennetta kuvaaviin tilavuusmalleihin, jolloin saataisiin aikaan maaperää huomattavasti tarkemmin kuvaavia malleja, kuin pelkkiä maalajien rajapintoja käyttämällä.

Asiasanat: mallintaminen, maaperä, luotettavuus, interpolointi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Infrastructure Construction

TARRI LASSI:
Reliability of Subsurface Models

Bachelor's thesis 49 pages, appendices 0 pages
May 2017

Ground survey results are typically presented as geological or geotechnical models in order to simplify subsurface conditions for planning and visualisation purposes. One of the aims of this study was to summarise the methods currently used in subsurface modelling and to determine obvious sources of errors related to subsurface models. In addition, the effect of sampling distance on reliability of surface models and the spatial variation of the bedrock surface within the data set was analysed using statistical methods. The LiDAR data set used in the analysis was acquired from the National Land Survey of Finland. Data set was classified and processed using modelling methods and GIS analyses in order to create graphs and key statistical figures.

Analyses were performed using both TIN and grid surfaces. The conducted study suggested that there is no noticeable difference in reliability whether the surface is modelled using TIN or grid method. Results suggested that decreasing sample spacing from 40 m to 5 m would not result in a noticeable improvement in the mean difference between the reference surfaces and the comparative surfaces. However, the standard deviation and the confidence interval of the mean difference at 95 % confidence level were reduced by approximately four times when sample spacing was decreased from 40 metres to 20 metres or from 10 metres to 5 metres. The spatial variation of the bedrock surface was described in the study as a distribution of bedrock elevation change over distance. Results suggested that, within the data set, the mean distribution of elevation change over distance may be presented linearly as a ratio of approximately 1:10.

Study showed that standard deviation and confidence interval of the mean differences describe the reliability of the surface models better than the mean difference itself. Furthermore, in this study it was found that analysing the spatial variation of the bedrock surface, within the large data set, gives relatively little information when describing the conditions of an individual site. However, the information could possibly be used when examining the confidence interval of the bedrock surface without any geostatistical methods. Even though the study suggested that interpolated grid surfaces cannot describe the reference surfaces better than TIN surfaces, there could be advantages using geospatial interpolation methods in surface and volumetric modelling. For example, confidence data generated with geostatistical interpolation methods could be used to outline TIN surfaces to present areas where confidence level is at desired level. In addition, using interpolation methods would enable property modelling in volumetric models. Compared to surface models, volumetric models with property information could describe the subsurface conditions in greater detail.

Key words: modelling, subsurface, geology, reliability, interpolation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	MAAPERÄN MALLINTAMINEN.....	8
2.1	Yleistä	8
2.2	Pintamallit	8
2.3	Tilavuusmallit	10
3	MAAPERÄMALLIEN LÄHTÖTIEDOT	13
3.1	Yleistä	13
3.2	Kairausmenetelmät	13
3.2.1	Yleistä	13
3.2.2	Painokairaus	14
3.2.3	Porakonekairaus	15
3.2.4	Heijarikairaus	15
3.2.5	Puristinkairaus.....	15
3.2.6	Puristin-heijarikairaus	16
3.2.7	Siipikairaus.....	16
3.2.8	Tärykairaus.....	16
3.3	Näytteenotto.....	16
3.4	Geofysikaaliset menetelmät.....	17
3.4.1	Yleistä	17
3.4.2	Maatutkaluotaus	17
3.4.3	Sähköinen vastusluotaus	18
3.4.4	Seisminen luotaus	19
3.4.5	Gravimetrinen mittaus.....	19
4	MAAPERÄN MALLINTAMISEEN LIITTYVÄ OHJEISTUS	20
4.1	Yleistä	20
4.2	Pohjatutkimukset	20
4.3	Pohjavesi.....	21
4.4	Pilaantunut maaperä.....	22
4.5	Yleiset inframallivaatimukset 2015	23
5	MAAPERÄMALLIEN LUOTETTAVUUTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	26
5.1	Yleistä	26
5.2	Havaintojen tiheys ja alueellinen kattavuus.....	26
5.3	Havaintojen ikä	27
5.4	Havaintojen merkittävyys	27
5.5	Sijainti- ja ominaisuustiedon tarkkuus.....	27

5.6	Lähtötietoaineiston mittakaava	28
5.7	Tiedonsiirto	29
6	TUTKIMUKSEN SUORITUS	31
6.1	Yleistä	31
6.2	Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto	31
6.3	Tutkimuksessa käytetyt ohjelmistot	32
6.4	Aineiston käsittely	33
7	TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA	36
7.1	Havaintopistevälin vaikutus kallionpintamallin luotettavuuteen	36
7.2	Kalliopinnan spatiaalinen vaihtelu	40
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	42
	LÄHTEET	46

ERITYISSANASTO

Alakvartiili	Alakvartiili on 25 % fraktiili, eli sen alapuolella on 25 % kaikista havaintoarvoista.
Keskihajonta	Keskihajonta ilmaisee havaintojen keskimääräisen poikkeaman keskiarvosta.
Luottamusväli	Luottamusväli ilmaisee satunnaisotoksesta laskettuihin lukuihin sisältyvän virhemarginaalin.
Mediaani	Mediaani on 50 % fraktiili, eli sen alapuolella on 50 % kaikista havaintoarvoista.
Spatiaalinen	Avaruudellinen; tilaa, sijaintia tai välimatkaa koskeva.
Yläkvartiili	Yläkvartiili on 75 % fraktiili, eli sen alapuolella on 75 % kaikista havaintoarvoista.

1 JOHDANTO

Maaperän tarkkojen ominaisuuksien selvittäminen on kallista ja aikaa vievää, jolloin riskinä on riittämättömän havaintoaineiston käyttäminen päätöksentekoon. Onkin sanottu, että rakennushankkeiden suurin tekninen ja taloudellinen riski löytyy maaperästä (The Institution of Civil Engineers 1991, 1).

Maaperän ominaisuuksia voidaan kartoittaa kairauksilla ja muilla maaperä- ja pohjatutkimusmenetelmillä. Ongelmaksi muodostuu kustannusten lisäksi maaperän heterogeenisyys: kuinka paljon mittaus- ja havaintoaineistoa alueen olosuhteista tarvitaan (Kuusela-Lahtinen, A. & Vahanne 2005, 3). Mikäli havaintoaineiston määrä ei ole riittävä, voivat kustannukset siirtyä hankkeen myöhempisiin vaiheisiin esimerkiksi niissä tapauksissa, kun:

- pohjarakenteet alisuunnitellaan optimistisen maaperämallin seurauksena
- pohjarakenteet ylisuunnitellaan pessimistisen maaperämallin seurauksena
- maaperän odottamattomat olosuhteet aiheuttavat muutoksia suunniteltuihin pohjarakenteisiin (Jaksa ym. 2005).

Havaintopisteiden väliin jää joka tapauksessa alueita, joista tietoa ei ole saatavilla. Yksinkertaisimmillaan ongelma ratkaistaan kolmioverkon avulla, jossa lähimmät pisteet yhdistetään toisiinsa lineaarisesti interpoloimalla. Esimerkiksi malminetsinnässä, jossa tarvitaan jatkuvaa tietoa kallioperän ominaisuuksista, ongelmaa on pyritty perinteisesti ratkaisemaan spatiaalisen interpoloinnin keinoin (Laine 2010). Spatiaalinen interpolointi perustuu havaintoon siitä, että mitä lähempänä toisiaan pisteet sijaitsevat, sitä lähempänä toisiaan ovat myös pisteissä mitatut arvot (Burrough & McDonnell 1998, 147).

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää millaisia menetelmiä maaperää kuvaavien kolmiulotteisten mallien laadinnassa käytetään ja mitkä tekijät vaikuttavat näiden mallien luotettavuuteen. Lisäksi tavoitteena oli tutkia miten havaintopisteiden välimatka vaikuttaa pintamallin luotettavuuteen sekä selvittää aineistona käytetyn laserkeilatun kallionpinnan spatiaalinen vaihtelu. Työn alkupuolen teoriaosuus tehtiin kirjallisuustutkimuksena. Työn loppuosan tilastollista tarkastelua varten laserkeilausaineistoa luokiteltiin ja käsiteltiin mallintamalla sekä paikkatietoanalyysien avulla. Luotettavuutta ja spatiaalista vaihtelua kuvattiin aineistosta muodostetuilla tilastollisilla tunnusluvulla ja kuvaajilla.

2 MAAPERÄN MALLINTAMINEN

2.1 Yleistä

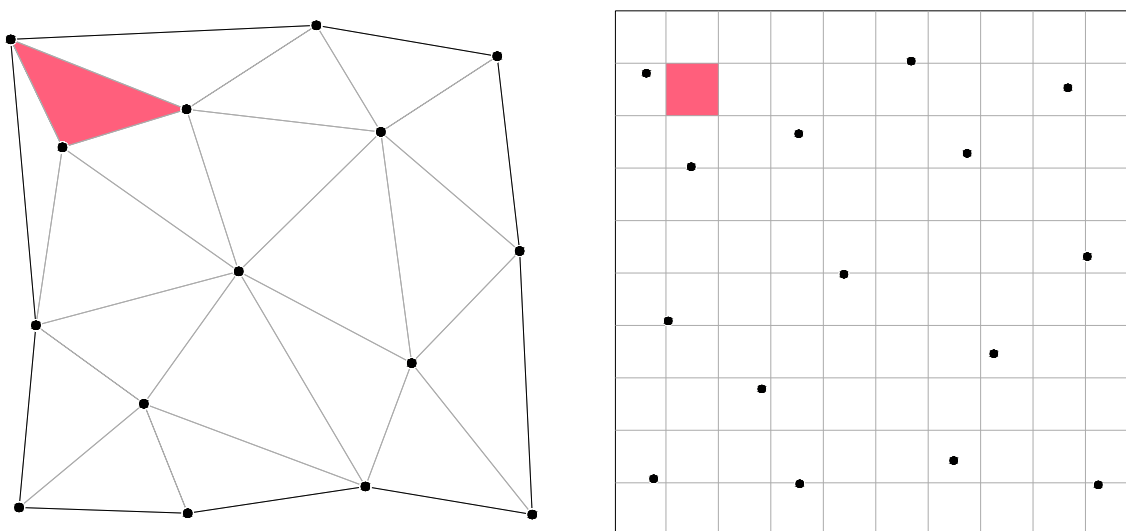
Risto Selinin (2001) mukaan mallit voidaan jakaa esittäviin ja teoreettisiin malleihin. Esittävä malli on esimerkiksi 3D-tulostettu pienoismalli tuotteesta. Teoreettisella mallilla tarkoitetaan puolestaan yksinkertaistettua kielellistä tai kuvallista esitystä mallinnettavasta kohteesta. Jos teoreettinen malli esitetään matemaattisena yhtälönä, puhutaan matemaattisesta mallista. Termissä lähtötietomalli mallilla tarkoitetaan kansiorakennetta, johon kohteen lähtötiedot tallennetaan ja organisoidaan suunnittelua varten (Liukas & Virtanen 2015, 6). Toisaalta mallintamisella voidaan tarkoittaa myös simulointia, kuten esimerkiksi pohjaveden virtausmallintamisen tai stabiliteettilaskennan yhteydessä (Seppälä & Tuominen 2005, 33; Mansikkamäki 2009, 3). Tässä opinnäytetyössä termillä mallinnus tarkoitetaan organisoidun tiedon esittämistä kolmiulotteisina teoreettisina malleina.

Maaperä- ja pohjatutkimuksiin liittyvä tieto esitetään tyypillisesti yksinkertaistettuina geologisina malleina, jotka toimivat lähtötietoina suunnittelulle ja mahdollistavat tiedon havainnollistamisen. Maaperämalli luodaan tietyn ongelman ratkaisua varten, jolloin sen tarkoitus lähtökohtaisesti ei ole kohteen geologian mahdollisimman tarkka kuvaaminen. Tästä syystä samasta kohteesta voi olla tarpeen tehdä useampi maaperämalli eri käyttötarkoituksia varten. Maaperämalli pyritään laatimaan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa hanketta, sillä sitä voi olla mahdollista käyttää esimerkiksi tutkimussuunnittelun työkaluna. Paras hyöty maaperämallista saadaan päivittämällä sitä aina kun kohteesta saadaan uutta tietoa. (Kvartsberg 2013, 9–10.)

2.2 Pintamallit

Maaperän mallintamisella tarkoitetaan yhdyskuntarakentamisen alalla yleensä pohjatutkimusaineistosta tulkittujen maalajirajojen yhdistämistä yhtenäisiksi pinnoiksi. Tyypillisesti maaperämallissa kuvataan useiden pintamallien avulla maalajikerrosten rajapintojen sekä kalliopinnan korkotasoja. (Liikennevirasto 2014, 7; Liukas & Virtanen 2015, 16.)

Pintamalli on tunnetuista korkeuspisteistä interpoloitu tasopinta, joka muodostuu toisiaan sivuavista soluista. Tyypillisesti pintamalli muodostetaan epäsäännöllisenä kolmioverkona tai tasavälisenä ruutuverkkona. Kuvassa 1 on esitetty samasta kuvitteellisesta havaintopistejoukosta muodostettu epäsäännöllinen kolmioverkko sekä ruutuverkko. Kuvassa havaintopisteet ovat esitetty mustina pisteinä ja yksittäisen solun muodostama alue punaisella täyttövärillä. (Tokola & Kalliovirta 2003, 52; Haggrén. & Honkavaara 2005.)



KUVA 1. Samasta havaintopistejoukosta muodostettu epäsäännöllinen kolmioverkko ja ruutuverkko.

Kolmioverkko muodostetaan tyypillisesti Delaunay-kolmioinnilla havaintopisteiden toimituksessa kolmioiden solmukohtina. Delaunay-kolmiointi tuottaa tasamuotoisia kolmiota pyrkimällä pitämään kolmion kulmat mahdollisimman pieninä. Pintamallin tarkkuuden kannalta on olennaista, että pitkiä ja kapeita kolmioita syntyisi mahdollisimman vähän. Havaintopisteiden väliin jäävän kolmion pinta on lineaarisesti interpoloitu kolmion solmupisteistä, eikä sen muodostumiseen vaikuta aineiston muut havaintopisteet. Menetelmän hyviä puolia ovat sen yksinkertaisuus ja toistettavuus sekä mahdollisuus käyttää osassa pintamallia tiheämpää havaintopisteväliä. Näin alueilla joissa spatiaalinen vaihtelu on suurta, pystytään käyttämään tiheämpää havaintopisteväliä. Vastaavasti alueet, joissa spatiaalinen vaihtelu on pientä, voidaan pinta esittää luotettavasti huomattavasti pienemmällä havaintopistemäärällä. (Burrough & McDonnell 1998, 42; Herva 2009, 9–10.)

Suunnitteluohjelmissa, joissa ei ole edistyneitä mallinnustyökaluja, on kolmioverkon käyttäminen ruutuverkkoa turvallisempi vaihtoehto. Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, ruutuverkko lasketaan tietyllä välillä, jolloin havaintopisteen tarkka arvo menetetään, ellei

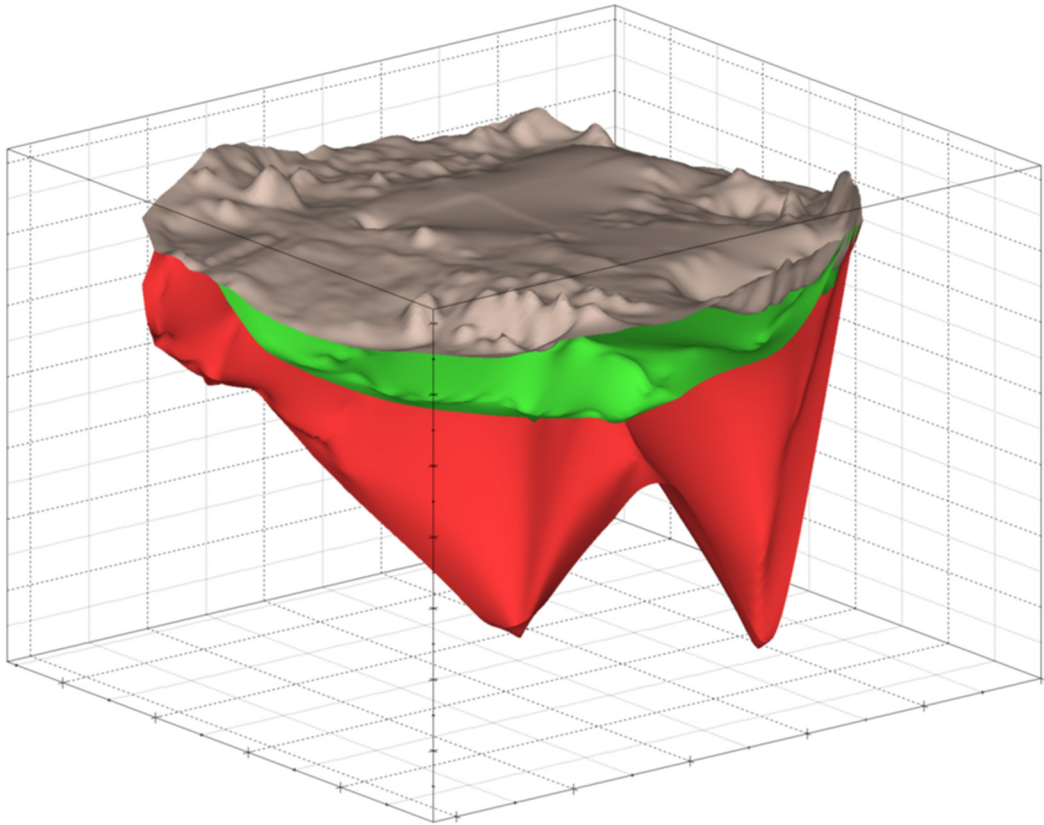
se osu juuri ruutuverkon solmukohtaan (Trimble 2009). Erityisesti mallintamiseen tarkoitetuissa ohjelmistoissa on kuitenkin mahdollista muodostaa ruutuverkko siten, että se sisältää todelliset mitatut arvot, jolloin tätä ongelmaa ei ole (C Tech 2016). Ruutuverkon käyttö muissakin ohjelmissa saattaa olla tietyissä tapauksissa perusteltua. Esimerkiksi jos havaintoaineisto on liian tiheää, sitä voi olla tarpeellista harventaa. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi mallinnettaessa pintaa laserkeilausaineistosta.

Ruutuverkon ero kolmioverkkoon on sen tyypillisesti suurempi solmupisteiden lukumäärä. Solmupisteiden arvoja on mahdollista ennustaa spatiaalisen interpoloinnin menetelmillä, vaikka havaintopistetieto ei olisi alueellisesti kattavaa. Spatiaalinen interpolointi perustuu autokorrelaatioon, eli havaintoon siitä, että mitä lähempänä toisiaan pisteet sijaitsevat, sitä lähempänä ovat myös pisteistä mitatut arvot. Spatiaalisissa interpolointimenetelmissä pyritään mallintamaan kohteella vallitseva autokorrelaatio ja käyttämään mallia hyväksi ennustettaessa ominaisuusarvoja tuntemattomille pisteille. (Burrough & McDonnell 1998, 147.)

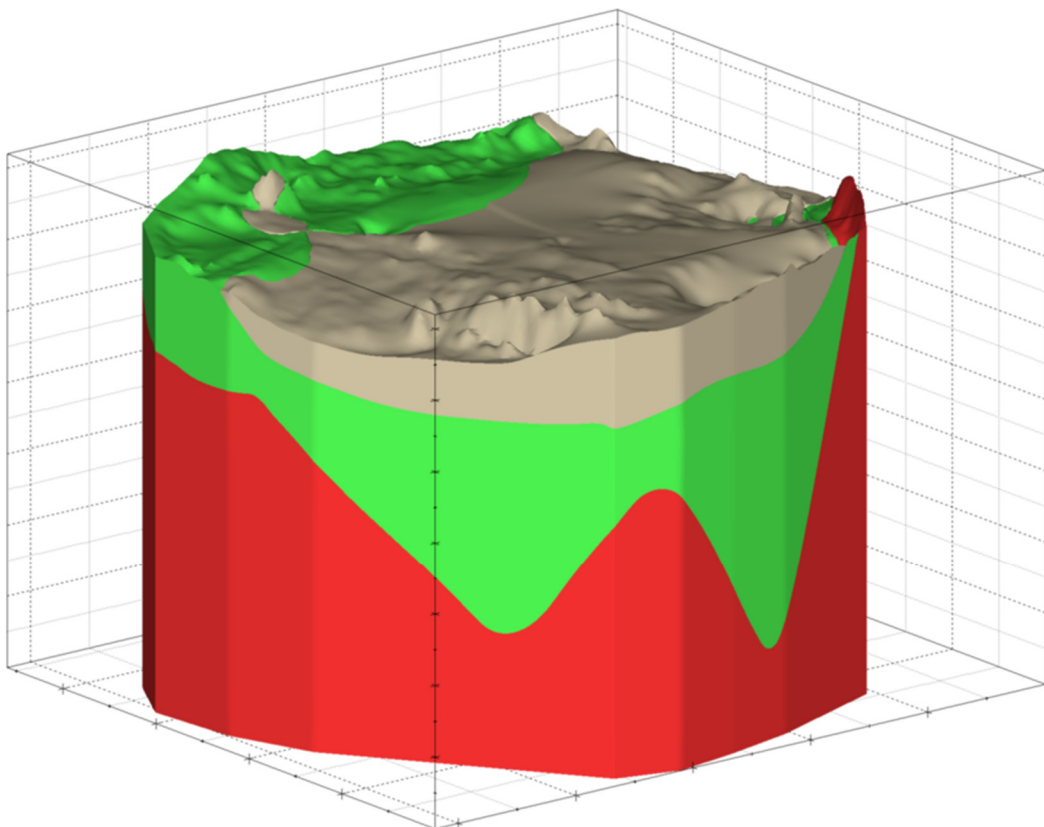
Interpolointimenetelmiä on useita, jolloin parhaaseen tulokseen päästään tuntemalla erilaiset menetelmät ja niiden sopivuus kyseiseen kohteeseen. Osa menetelmistä sopii esimerkiksi paremmin systemaattisesti sijoitettujen havaintojen interpolointiin ja osa satunnaisesti sijoitettujen havaintojen interpolointiin. Interpolointi voidaan tehdä joko deterministisillä tai geostatistisilla interpolointimenetelmillä. Deterministiset menetelmät käyttävät interpolointiin matemaattisia funktioita ja geostatistiset näiden lisäksi tilastollisia menetelmiä. Geostatististen menetelmien etu on niiden kyky tuottaa tietoa interpoloitujen pisteiden luotettavuudesta. (Tokola & Kalliovirta 2003, 28–29.)

2.3 Tilavuusmallit

Geotieteissä maaperän mallintamisella voidaan rajapintojen mallintamisen ohella tarkoittaa maaperän rakennetta ja ominaisuuksia kuvaavien kolmiulotteisten tilavuusmallien laadintaa (Koivulehto 2016, 33–35; Lindsberg, Valpola, Valjus & Okkonen 2014, 10–11). Tilavuusmalli voidaan muodostaa esimerkiksi kahden pintamallin välille, jolloin sille muodostuu nimensä mukaisesti tilavuus (Lindsberg ym. 2014, 10–11). Pintamallin ja tilavuusmallin eroa on havainnollistettu kuvassa 2 ja 3. Kuvassa 2 on kohteen yksinkertaistettu maaperän rakenne esitetty pintamalleina ja kuvassa 3 tilavuusmalleina.

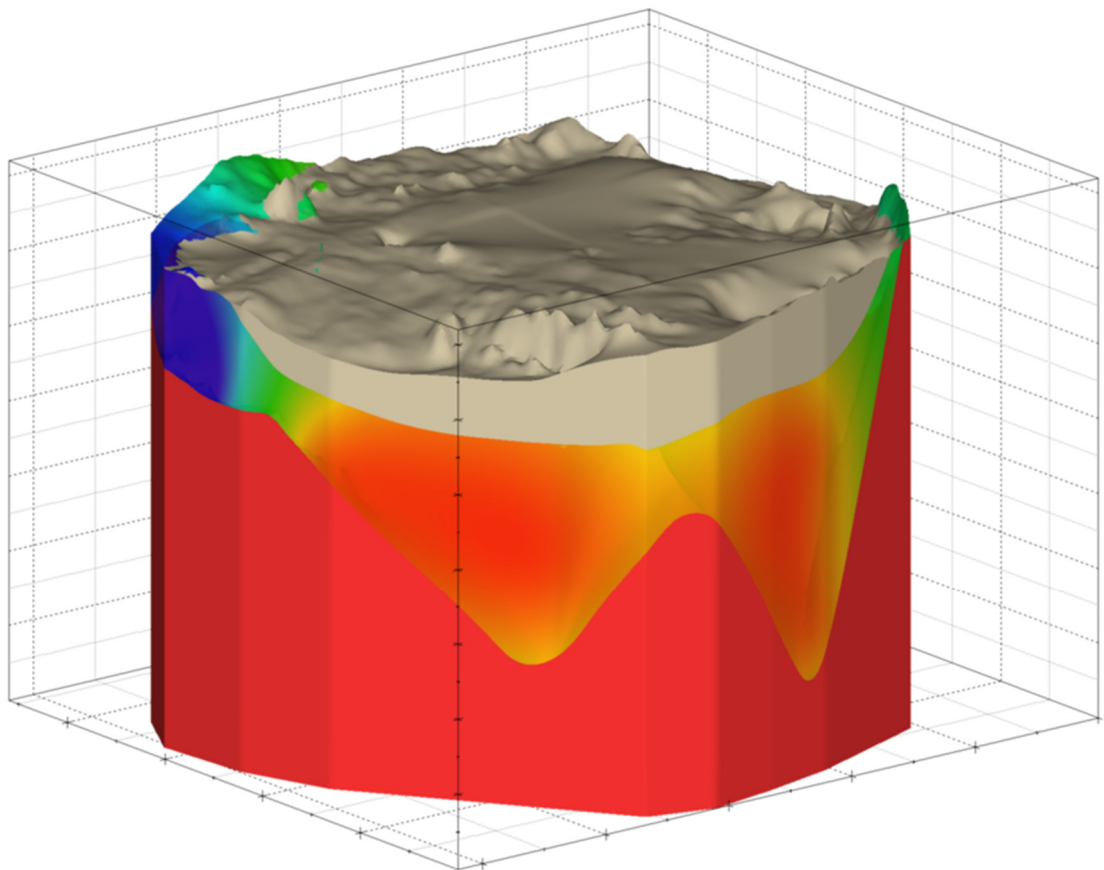


KUVA 2. Yksinkertaistettu maaperän rakenne esitettynä pintamalleina.



KUVA 3. Yksinkertaistettu maaperän rakenne esitettynä tilavuusmalleina.

Suunnitteluohjelmistoilla voidaan laskea helposti pintamallien väliin jääviä tilavuuksia, joten tilavuusmallien käyttö ei määrien ja tilavuuksien laskemiseen tuo juurikaan lisäarvoa (Autodesk 2016). Etuna voidaan pitää niiden mahdollisesti parempaa soveltuvuutta havainnollistamiseen. Mallintamalla tilavuusmalliin maaperän geoteknisiä ominaisuuksia, kuten vedenläpäisevyyttä, lujuutta ja kokoonpuristuvuutta, saadaan aikaan maaperää huomattavasti tarkemmin kuvaava malli, kuin pelkkiä maalajien rajapintoja käyttämällä (Kessler ym. 2008). Ominaisuustietojen mallintamista on käytetty pitkään myös malmin esiintymien arvioinnissa, jossa tarvitaan jatkuvaa tietoa mineraalipitoisuuksien vaihtelusta kallioperässä. Nykyisin menetelmää sovelletaan myös maaperätutkimuksissa. Esimerkiksi maaperän haitta-aineiden analysointi on kallista, jolloin maaperän pilaantuneisuutta voidaan arvioida rajallisesta aineistosta interpolointimenetelmiä käyttäen (Laine 2010). Kuvassa 4 on käytetty liukuvärejä havainnollistamaan maaperämallin ominaisuusarvoja.



KUVA 4. Interpoloimalla laskettuja maaperämallin ominaisuusarvoja voidaan havainnollistaa esimerkiksi liukuvärejä käyttämällä.

3 MAAPERÄMALLIEN LÄHTÖTIEDOT

3.1 Yleistä

Maaperän kolmiulotteiseen mallintamiseen tarvitaan lähtötietona tietoa maaperän ominaisuuksista. Maaperästä saadaan yleispiirteistä tietoa ainetta rikkomattomilla menetelmillä, kuten karttatarkasteluilla, maastokäynneillä ja geofysikaalisilla mittauksilla. Yleensä luotettavia lähtötietoja varten tarvitaan kuitenkin kairauksia tai muita ainetta rikkovia menetelmiä. (Kvartsberg 2013.)

Kairausmenetelmillä saatujen tulosten perusteella voidaan tehdä suuntaa antavia tulkin-toja esimerkiksi maalajiryhmästä, mutta tarkempia lisätietoja varten on maaperästä otet-tava näytteitä. Kairausmenetelmien lisäksi koekuopat ovat yksinkertainen ja luotettava menetelmä maaperän pinnan läheisten rakenteiden tutkimiseen. (Jääskeläinen 2011, 258; 274.)

Pohjavesi vaikuttaa oleellisesti maaperän ominaisuuksiin, minkä vuoksi esimerkiksi tieto pohjaveden korkeustasosta on oleellinen jokaisessa rakennushankkeessa. Korkeustasoa ja muita pohjaveteen liittyviä maaperän ja veden laadun ominaisuuksia voidaan luotetta-vimmin tutkia kairaamalla asennettavien pohjaveden havaintoputkien avulla. (Jääskeläi-nen 2011, 280–281; Suomen Vesiyhdistys 2005, 8–10, 76.)

3.2 Kairausmenetelmät

3.2.1 Yleistä

Kairausmenetelmissä tulee ottaa huomioon niiden soveltuvuus maalajirajojen määrittä-miseen. Maakerrosten rakennetta koskevissa tutkimuksissa sopivimpia kairausmenetel-miä ovat ne, joissa yksiselitteisen kairausvastuksen ohella voidaan tehdä myös muita ha-vaintoja. Luotettavin tulos saadaan kuitenkin, kun kairauksen yhteydessä otetaan maa-näyte ja analysoidaan se laboratoriossa. Yleisimmät kairausmenetelmät ja niiden käyttö-tarkoitukset ovat esitetty taulukossa 1. (Jääskeläinen 2011, 242–243.)

TAULUKKO 1. Yleisimmät kairausmenetelmät ja niiden käyttötarkoitus (mukailtu SGY 1983, 51).

Käyttötarkoitus	Kallion pinnan sijainti	Tiiviin pohjakerroksen sijainti	Tiiviydeltään erilaisten maakerrosten rajat	Maakerrosten lujuus likimäärin	Maakerrosten lujuus tarkasti	Maakerrosten tiiviyys likimäärin	Maalajiryhmä
Kairausmenetelmä							
Painokairaus	-	o	o	-	x	o	o
Heijarikairaus	-	o	-	-	x	o	-
Puristinkairaus	x	-	o	o	x	o	o
Siipikairaus	x	x	x	x	o	x	x
Tärykairaus	-	o	x	x	x	x	-
Porakonekairaus	o	-	x	x	x	x	x

o	Kairausmenetelmän pääasiallinen käyttötarkoitus
-	Kairausmenetelmän toissijainen käyttötarkoitus
x	Kairausmenetelmä ei sovellu kyseiseen käyttötarkoitukseen

3.2.2 Painokairaus

Painokairaus on yleisin Suomessa käytetty kairausmenetelmä. Painokairauksessa kaira upotetaan maahan lisäämällä kuormitusta, kunnes kaira saadaan painumaan. Jos kaira ei painu täydellä 1 kN kuormalla, aloitetaan kiertäminen, jonka aikana kairaa kuormitetaan täydellä kuormalla. Jos kaira ei painu kiertämälläkään, poistetaan kuormitus ja isketään kairaa maahan. Kun kaira ei painu lyömällä, on kairaus päättynyt. Kairauksesta tallennetaan 20 senttimetrin tunkeutumiseen tarvittun kuorman suuruus, puolikierrosten lukumäärä sekä syvyydet, joissa kairaa on isketty. Kerätyn mittausaineiston avulla voidaan arvioida varmimmin hiekan, soran ja löyhän moreenin suhteellista tiiveyttä, kuivatilavuuspainoa, kitkakulmaa, kokoonpuristuvuusmoduulia ja jännityseksponenttia. Koheesiomaiden leikkauslujuuden arviointi ja silttimaiden parametrien tulkitseminen painokairaamalla on hyvin epävarmaa. Menetelmä antaa kuitenkin tietoa pehmeiden kerrosten sijainnista, jolloin niitä voidaan tutkia tarkemmin muilla menetelmillä. (Jääskeläinen 2011, 246–250.)

3.2.3 Porakonekairaus

Kairausmenetelmistä porakonekairauksella on mahdollista varmimmin määrittää kallionpinta, muiden menetelmien pysähtyessä mahdollisiin kiviin tai lohkkareisiin. Kairausta jatketaan oletetusta kallionpinnasta vähintään 3 metriä, jotta voidaan varmistua, että kyseessä ei ole kivi tai lohkkare. Usein kairaus aloitetaan muulla menetelmällä, jolloin maaperästä saadaan enemmän tietoa. Porakonekairauksissa kerätään tietoa porausnopeudesta ja kallion rikkonaisuudesta, jolloin saadaan tietoa kallion laadusta. (Jääskeläinen 2011, 257–259.)

3.2.4 Heijarikairaus

Heijarikairaus on tiiviiden maiden tutkimiseen käytetty kairausmenetelmä, jota käytetään muun muassa paalujen uppoamasyvyyksien arviointiin. Heijarikairauksessa kärkikappaletta upotetaan maahan pudotuskappaleen aiheuttaman iskun avulla. Jokainen isku tekee saman fysikaalisen työn, jolloin tietyn suuruiseen uppoamaan tarvittavien iskujen lukumäärä kertoo maan lujuusominaisuuksista. Lisäksi kairaukseen pyöritetään iskusarjojen välillä tankojen vääntymisen ehkäisemiseksi. Kairauksesta tallennetaan 20 senttimetrin tunkeutumiseen tarvittujen iskujen määrä. Jos kairauksella ei päästä tavoitesyvyyteen, kairaus lopetetaan yleensä, kun yhden millimetrin tunkeutumaan tarvitaan enemmän kuin yksi isku. (Jääskeläinen 2011, 253–254.)

3.2.5 Puristinkairaus

Puristinkairauksessa kärkikappaletta puristetaan maahan vakionopeudella, samalla mitaten voimia, joita kullakin syvyydellä puristamiseen tarvitaan. Puristinkairaus sopii kivetömiin ja pehmeisiin, soraa hienojakoisempiin maihin. Ohuiden kerrosten tulkintaan menetelmä ei sovellu, sillä kärkivastukseen vaikuttaa niin ylä- kuin alapuolinenkin maa. Anturit mittaavat vastusta jatkuvasti, joten mittauksen resoluutio on suurempi, kuin esimerkiksi painokairauksessa. Kärkiosaan voidaan liittää kärkivoimamittarin lisäksi myös kitkavoima- ja huokospainemittari, jolloin maaperästä saadaan monipuolista tietoa. Tällaista puristinkairaa kutsutaan CPTU-puristinkairaksi. (Jääskeläinen 2011, 263–264.)

3.2.6 Puristin-heijarikairaus

Puristin-heijarikaurauksessa yhdistetään nimensä mukaisesti puristin- ja heijarikairauksen ominaisuudet, jolloin sillä saadaan tietoa pehmeistä ja löyhistä maista aina tiiviisiin maakerroksiin asti. Kairaus aloitetaan yleensä puristinkairauksella, jota jatketaan kunnes on saavutettu suurin käytettävissä oleva puristusvoima. Tämän jälkeen siirrytään heijarikairaukseen, josta voidaan palata takaisin puristinkairaukseen, mikäli löyhempiä kerroksia tulee vastaan. (Jääskeläinen 2011, 267–268.)

3.2.7 Siipikairaus

Siipikairausta käytetään koheesiomaiden leikkauslujuuden arvioimiseen. Kitkamaihin ja karkeaan silttiin siipikairauksia ei tehdä. Siipikairauksessa tallennetaan tieto siiven pyörittämiseen tarvittavasta momentista, jolloin siipikairan terän koon perusteella voidaan laskea saven leikkauslujuus kullakin syvyydellä. Yleensä siipikairaus tehdään viimeispänä, kun muilla menetelmillä on selvitetty missä kohtaa tutkimusaluetta syvimmit ja pehmeimmät savikot sijaitsevat. Siipikairaus tehdään valituissa tutkimuspisteissä 0,5 tai 1 metrin välein savikon pohjaan asti. (Jääskeläinen 2011, 261–262.)

3.2.8 Tärykairaus

Tärykairauksessa upotetaan tanko tärytyksen avulla maaperään. Menetelmällä ei saada juurikaan tietoa maaperän rakenteista, mutta sillä voidaan varmistaa, ettei kalliota ole tietyn tason yläpuolella. (Jääskeläinen 2011, 256.)

3.3 Näytteenotto

Kairausten tarkempaan tulkintaan ja sellaisten maaperän ominaisuuksien selvittämiseen, joita ei maata rikkomattomilla menetelmillä voida selvittää, tarvitaan maaperänäytteitä laboratorio- tai kenttätutkimuksia varten. Tutkimuksia varten voidaan maaperästä ottaa näytteitä esimerkiksi koekuopasta tai kaivannosta. Usein näyte tarvitaan syvemmältä

maaperästä, jolloin näyte otetaan kairaan kiinnitettävällä näytteenottimella. Näytteenottimia on erityyppisiä. Sopivan näytteenottimen valinta riippuu tutkittavasta ominaisuudesta. (Jääskeläinen 2011, 274–276.)

Lujuus- ja muodonmuutoskokeita varten on otettava häiriintymättömiä näytteitä, joissa maaperän rakenne pyritään säilyttämään mahdollisimman luonnontilaisena. Täysin häiriintymätöntä näytettä on kuitenkin mahdotonta ottaa, sillä esimerkiksi maan jännitystila muuttuu vääjäämättä, kun maa-aines nostetaan maaperästä. Yleensä tarvittavat tutkimukset voidaan tehdä häiriintyneestä näytteestä, jolloin näytteenotto on edullisempaa. (Jääskeläinen 2011, 274–276; Ronkanen 2012, 17.)

3.4 Geofysikaaliset menetelmät

3.4.1 Yleistä

Geofysikaaliset menetelmät ovat ainetta rikkomattomia, maaperän eri fysikaalisia ominaisuuksia mittaavia menetelmiä. Menetelmät toimivat parhaiten silloin, kun maaperässä on ominaisuuksiltaan huomattavasti toisistaan poikkeavia kerroksia. Mittausten luotettava tulkinta vaatii aina referenssitietona kairauksia ja näytteenottoa. Geofysikaalisten menetelmien käyttöä rajoittaa niiden huono tarkkuus verrattuna kairaamalla tehtyihin havaintoihin. Toisaalta niillä saadaan nopeasti tietoa laajalta alueelta. (Rantanen, Patjas & Arkima 2007, 15.)

3.4.2 Maatutkaluotaus

Maatutkaluotaus perustuu laitteen antennin maaperään lähettämien lyhytkestoisten sähkömagneettisten pulssien takaisin heijastuvien osien rekisteröintiin. Kun lähetetty pulssi kohtaa rajapinnan, jossa maaperän ominaisuudet muuttuvat, heijastuu osa aaltoenergiasta takaisin osan jatkaessa etenemistään rajapinnan läpi. Laite mittaa takaisin heijastuneen aallon amplitudin sekä ajan, joka on kulunut aallon lähtöhetkestä sen paluuhetkeen. Kun

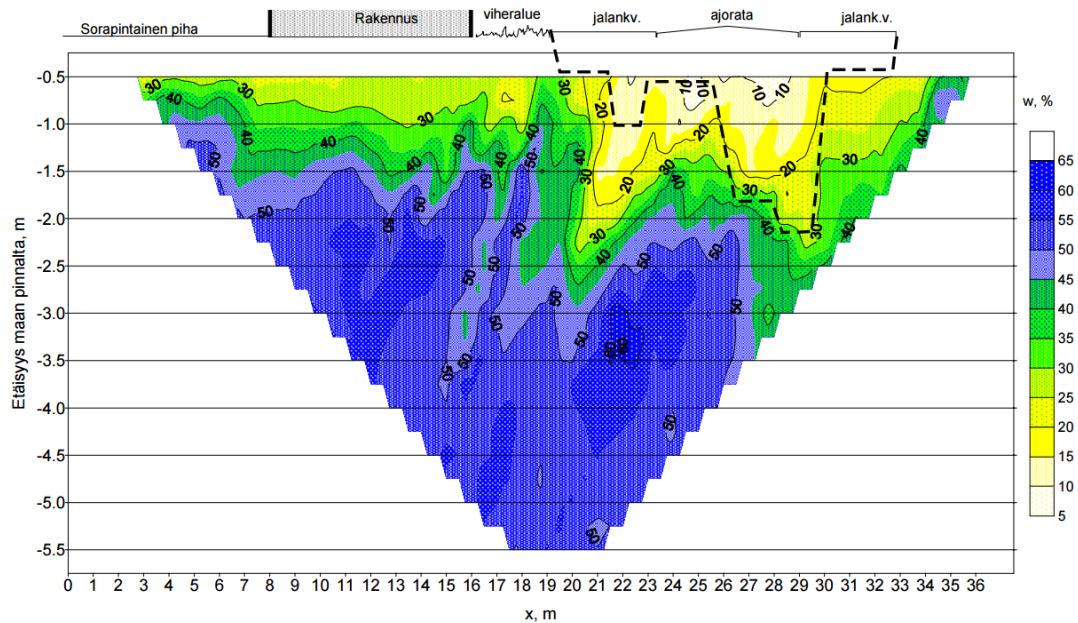
mittalaitetta liikutetaan, saadaan aikaiseksi jatkuva profiili sähköisistä rajapinnoista. Sähköiset rajapinnat ovat edelleen tulkittavissa maalajien rajapinnoiksi ja kallionpinnaksi. (Hänninen 1991, 6; Rantanen, Patjas & Arkima 2007, 9–13.)

Maatutka soveltuu parhaiten hiekkaa karkeampien maalajien tulkintaan, sillä niissä aalto pystyy tunkeutumaan maaperään helposti. Hienoaaines ja suolapitoisuus puolestaan vaikeuttavat aaltoa. Savi- ja silttialueilla kallionpinta tai muu tiivis pinta voidaan erottaa parhaimmillaankin vain muutaman metrin syvyydestä. Karkeammilla maalajeilla tiivis pinta voidaan puolestaan erottaa vielä noin 30–50 metrin syvyydestä. (Paalijärvi 2009, 2; Mäkinen 2013, 3.)

Aallon tunkeutumiseen maaperään vaikuttaa maalajin ja maaperän ominaisuuksien lisäksi mittauksessa käytetty antenni, eli pulssin aallonpituus. Mitä pidempää aallonpituutta käytetään, sitä syvemmälle aalto tunkeutuu. Toisaalta lyhyillä aallonpituuksilla mittauksen erottelukyky on tarkempi, jolloin saadaan tarkempaa tietoa lähellä maanpintaa olevista rakenteista, kuten teiden päällysteiden ja rakennekerrosten paksuuksista. (Hänninen 1991, 5; Rantanen, Patjas & Arkima 2007, 13–14.)

3.4.3 Sähköinen vastusluotaus

Maaperän sähköinen vastusluotaus tapahtuu asentamalla maahan mittauselektrodeita vakioetäisyydelle toisistaan. Syöttämällä virtaa elektrodista ja mittaamalla potentiaaliero toisesta elektrodista saadaan selville maaperän sähköinen vastus. Mitä kauempana toisistaan sijaitsevista elektrodeista potentiaaliero mitataan, sitä syvemmältä maaperästä sähköinen vastus saadaan selville. Toisaalta syvyysulottuvuuden kasvattaminen heikentää luotauksen erottelukykyä. Yhdellä mittauksella maaperästä saadaan keilamainen vastuskuvaaja, kun syvin mitattu tieto perustuu mittalinjan ääripäissä olevien elektrodien väliseen potentiaalieroon. Kuvaus yhden mittaukserran tuloksiin perustuvasta maaperän vesipitoisuusjakaumasta on esitetty kuvassa 5. Toisin kuin maatutkaluotaus, sähköinen vastusluotaus toimii parhaiten kosteilla maalajeilla, joten se on omimmillaan savipehmeiköillä. (Törnqvist, Laaksonen & Juvankoski 2001, 4–5.)



KUVA 5. Yhdellä mittaukskerralla maaperän vesipitoisuusjakaumasta muodostettu kuvaus (Törnqvist ym. 2001, 7).

3.4.4 Seisminen luotaus

Seisemisellä luotauksella saadaan tietoja maaperän tiiveydestä ja kosteudesta sekä kallio-
perän rikkonaisuudesta aina 100 metriin asti. Seisminen luotaus perustuu mittaamalla rä-
jäytyspanoksella tai lyömällä aikaansaadun täryaallon kulkuaika lähtöpisteestä maahan
kiinnitetyille antureille, geofoneille. Maa- ja kallio-
perän ominaisuudet määrittävät aallon
kulkunopeuden, jolloin geofoneissa rekisteröityjen kulkuaikojen perusteella voidaan piir-
tää leikkaus, johon on tulkittu maalajit, pohjaveden pinta, maapeitteen paksuus sekä kal-
lion mahdollinen rikkonaisuus. (GTK 2017b.)

3.4.5 Gravimetrinen mittaus

Gravimetrinen mittaus, eli painovoimamittaus, perustuu maa- ja kallio-
perän tiheyseroi-
hin. Menetelmällä voidaan arvioida likimääräisesti maaperäkerroksen paksuutta mittaa-
malla 20 metrin välein suoralla mittauslinjalla maan painovoimakentän muutoksia. Jos
maanpinnan korkeus mitataan, saadaan tuloksista laskettua myös kallio-
pinnan topografia. Menetelmän tarkkuutta on mahdollista parantaa käyttämällä referenssinä kairaamalla saa-
tuja tuloksia sekä hyödyntämällä tutkimusalueen kallio-
paljastumia profiilien alku ja lop-
pupisteissä. (GTK 2017a; GTK 2017b.)

4 MAAPERÄN MALLINTAMISEEN LIITTYVÄ OHJEISTUS

4.1 Yleistä

Maaperämallien laadun ja tietosisällön määrittelee pitkälti niihin käytetty lähtötietoaineisto. Lähtötietoaineistoa saadaan pohja- ja muista maaperätutkimuksista, joita puolestaan ohjaavat lait ja asetukset sekä erilaiset standardit, ohjeet ja suositukset. Maaperän mallintamista yhdyskuntateknisten rakennushankkeiden näkökulmasta ohjeistaa myös Yleiset inframallivaatimukset.

Maaperän tutkimisesta määrätään rakennuskokoelman osassa B3: Pohjarakenteet, joka sisältää täydentäviä määräyksiä ja ohjeita maankäyttö- ja rakennuslakiin. Määräyksessä käsitellään pohjatutkimusten lisäksi muun muassa pohjaveden ja pilaantuneen maaperän tutkimista.

4.2 Pohjatutkimukset

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B3 (2004, 5) mukaan pohjatutkimuksesta saatujen tulosten perusteella on pystyttävä selvittämään kohteen ja sen vaikutusalueen maaperän kerrosrakenne, kalliopinnan sijainti sekä maaperän, kallion ja pohjaveden ominaisuudet siten, että rakenteet voidaan mitoittaa tarkoituksenmukaisiksi ja turvallisiksi. Lisäksi pohjatutkimuksen perusteella on kohteella olevien maanalaisten rakenteiden sijainnit ja ominaisuudet selvittävä suunnittelun ja rakentamisen vaatimassa laajuudessa. Tutkimuspisteiden määrä ja tutkimusmenetelmät riippuvat kohteen maaperästä ja kuorituksista. Tutkimuspisteiden sijaintiin vaikuttavat myös olemassa olevat ja suunnitellut rakenteet.

Pohjatutkimusten tutkimuspisteväliä on ohjeistettu esimerkiksi Suomen geoteknillisen yhdistyksen (SGY 1983, 19), Suomen rakennusinsinöörien liiton (RIL 2005, 31) sekä Liikenneviraston (2015, 44–52) julkaisemissa ohjeissa. Pohjatutkimuksen lopulliseksi tutkimuspisteväliksi suositellaan noin 5–15 metriä, riippuen tutkittavista ominaisuuksista ja maaperän rakenteesta. Mikäli aiempia tutkimustuloksia ei ole käytettävissä, riittää alus-

tavissa suunnitteluvaiheissa harvemmallalla pistetiheydellä tehdyt tutkimukset. Suunnittelun edetessä tutkimuspisteväliä tihennetään niin, että suunnittelijoilla on aina käytössään riittävät lähtötiedot. Tutkimuspisteväliä tihennetään tapauskohtaisesti suosituksista, jos maaperä on erittäin heterogeenista. Vastaavasti väliä voidaan harventaa, jos maaperä on hyvin homogeenista. Lisäksi tutkimuspisteitä on yleensä tarpeellista sijoittaa tiheimmin alueille, joihin on suunniteltu raskaasti kuormitettuja tai muuten tärkeitä rakenteita. Pohjatutkimukset tulee suorittaa hyväkuntoisilla välineillä käyttäen luotettavaksi osoitettuja menetelmiä. Taulukossa 2 on esitetty talonrakennushankkeen ja taulukossa 3 tie- ja ratahankkeen eri suunnitteluvaiheissa suositeltuja välejä tutkimuspisteille.

TAULUKKO 2. Tutkimuspisteiden suositeltu havaintoväli talonrakennushankkeen eri suunnitteluvaiheissa (mukailtu SGY 1983, 27).

Suunnitteluvaihe	Tutkimuslinjojen väli [m]	Pisteväli tutkimuslinjalla [m]
Ennakkosuunnittelu (hankinta-tutkimus)	40...100	30...50
Hankesuunnittelu (tonttitutkimus)	20...80	15...40
Luonnossuunnittelu (yleispiirteinen pohjatutkimus)		10...30
Rakennussuunnittelu (yksityiskohtainen pohjatutkimus)		5...15

TAULUKKO 3. Tutkimuspisteiden suositeltu havaintoväli tie- ja ratahankkeen eri suunnitteluvaiheissa (mukailtu Liikennevirasto 2015, 46, 48, 51).

Suunnitteluvaihe	Pisteiden lukumäärä poikkileikkausta kohti	Pisteväli tutkimuslinjalla [m]
Yleissuunnittelu	1...2 kpl	40...120
Tie- / ratasuunnittelu	2...5 kpl, väli < 25 m	10...40
Rakentamis- / rakennussuunnittelu	2...5 kpl, väli < 25 m	10...40

4.3 Pohjavesi

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa B3 (2004, 6) veloitetaan selvittämään rakennuskohteen pohjavedenpinnan keskimääräinen korkeus ja vaihtelurajat, ellei vastaava pohjarakennesuunnittelija totea selvityksiä tarpeettomiksi. Myös pohjavesialtaan laajuus ja pohjaveden korvautuvuus on selvitettävä, mikäli pohjavedenpinnan korkeuden muutoksista voi aiheutua haittaa kohteessa tai sen ympäristössä sijaitseville rakenteille tai

luonnolle. Pohjavesihavaintoja tulee tehdä riittävästi, jotta vaihtelurajat pystytään arvioimaan luotettavasti. Pohjavesihavaintojen keräämistä jatketaan rakentamisen aikana ja rakentamisen jälkeen esimerkiksi silloin, kun rakennuskaivanto ulottuu pohja- tai orsivedenpinnan alapuolelle.

Pohjavedenpinnan korkeus voidaan mitata luotettavasti vain oikein asennetusta havaintoputkesta, jonka siiviläosa on sijoitettu riittävän läpäisevään maakerrokseen ja jonka toimivuus on tarkastettu. Havaintoputken materiaalina käytetään muovia, ellei sen käyttöön ole teknisiä esteitä. Teräsputkien ongelmana on ruostuminen, jolloin ne eivät sovellu pohjavesinäytteiden ottamiseen. Pohjaveden mukana voi kulkeutua rakennusmateriaaleja syövyttäviä aineita, jolloin laadun selvittäminen on tarpeellista rakennettaessa pohjavedenpinnan alapuolelle. Pohjaveden laatua tarkkaillaan myös rakennettaessa tärkeälle pohjavesialueelle. (RIL 2005, 32; Suomen Vesiyhdistys 2005, 98–90; SGY 1983, 56.)

4.4 Pilaantunut maaperä

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B3 (2004, 8) mukaan rakennuskohteen maaperän pilaantumattomuus on selvitettävä, sillä maasta rakennukseen siirtyvien haitallisten aineiden pitoisuudet eivät saa ylittää rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan määritettyä arvoa. Rakentamisen aikana on varauduttava maaperässä olevien terveydelle ja ympäristölle haitallisten aineiden varalta.

Rakentamismääräyskokoelmassa (RakMK B3 2004, 8) todetaan myös, että kohteissa, joissa ennakkokartoituksen perusteella ei epäillä maaperän pilaantumista, ei tutkimuksia välttämättä tarvita. Syyt, joiden perusteella tutkimukset on päätetty jättää tekemättä, on kuitenkin esitettävä kirjallisesti rakennuskohteen suunnitelma-asiakirjoissa. Näihin perusteluihin kuuluu kohteen aikaisemman toiminnan selvittäminen sekä paikan aiempien tutkimusten riittävyyden arviointi.

Haitta-aineet leviävät yleensä veden välityksellä, jolloin ne voivat levitä pohjaveden mukana ihmisten juomaveteen. Haitta-aineet voivat kulkeutua ihmisiin myös esimerkiksi pölynä, kaasuna tai ihmisten suorassa kontaktissa maaperään. (RIL 2005, 42.)

Tutkimukset on syytä tehdä vähintään kahdessa vaiheessa. Aluksi selvitetään pilaantumisen laatu ja myöhemmin pilaantuneiden alueiden laajuus ja mahdolliset kunnostusedellytykset. Tutkimustulosten arviointi edellyttää yleensä alueen taustapitoisuuksien selvittämistä. Tarkastelussa on otettava huomioon myös aikaisemman rakentamisen ja rakennusaineiden mahdollinen vaikutus maaperän pilaantumiseen (RIL 2005, 43.)

4.5 Yleiset inframallivaatimukset 2015

Tässä kappaleessa esitetään tiivistetysti Yleisten inframallivaatimusten 2015 eri osissa esitetyt maaperän mallintamiseen liittyvät ohjeistukset. Yleisiä inframallivaatimuksia käsitellään työssä erikseen, jotta kappaletta voisi käyttää sellaisenaan lyhyenä referenssinä tietomallinnushankkeissa maaperän mallintamisen osalta.

Yleisten inframallivaatimusten mukaan maaperän mallintamisen ei tule olla itsetarkoitus rakennushankkeessa, vaan se tehdään aina tiettyä käyttötarkoitusta varten. Esimerkiksi kallionpintamallia ei ole tarkoituksenmukaista tuottaa, jos sillä ei ole syvyytensä vuoksi vaikutusta suunnitteluratkaisuihin. Lisäksi hankkeiden varhaisissa suunnitteluvaiheissa ei välttämättä ole vielä riittävästi pohjatutkimustietoa, jotta niiden pohjalta tehty maaperämalli olisi käyttökelpoinen. Maaperämallin laatimistarve ja laajuus tulee määritellä hanke- ja suunnitteluvaihekohtaisesti. (Janhunen, Pienimäki & Parantala 2015, 14, 20.)

Maaperämalliksi kutsutaan pohjatutkimusten perusteella tulkittujen rajapintojen joukkoa. Esimerkiksi tie-, katu- ja ratasuunnitelmavaiheessa muodostettava maaperämalli koostuu:

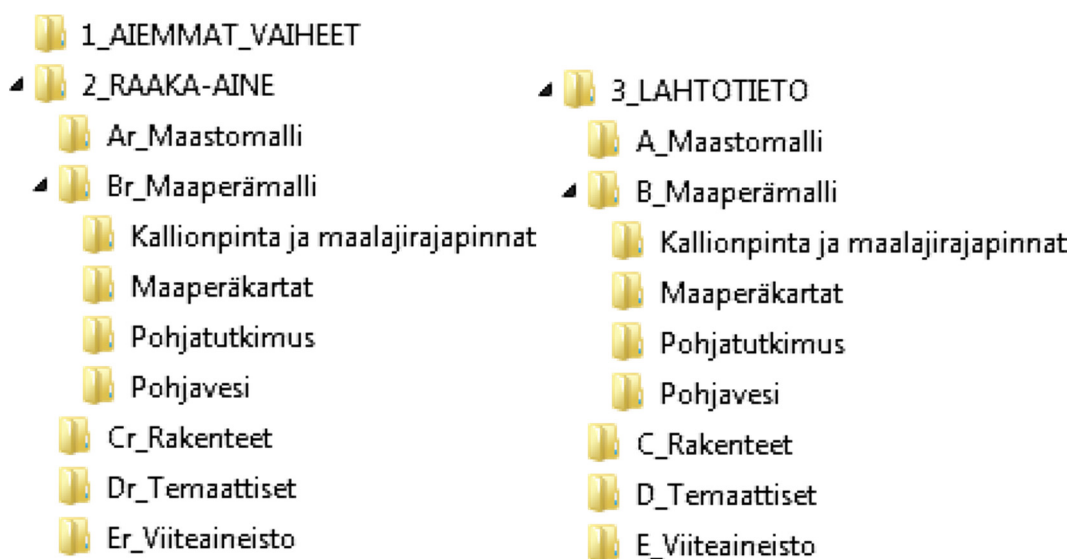
- kallionpinnasta
- maalajikerroksista
- pohjaveden pinnasta
- olemassa olevista pohjanvahvistuksista (Liukas & Virtanen 2015, 16; Janhunen ym. 2015, 21.)

Rajapinnat muodostetaan mitatuista pisteistä ja viivoista sekä näistä muodostetusta kolmioverkkopinnoista. Kalliopinnan osalta tulee erotella avokalliohavainnot, porakonekairauksilla määritetyt pisteet ja epävarmoihin havaintoihin, kuten painokairauksiin ja pinnanmuotojen tulkintaan perustuvat pisteet. (Liukas & Virtanen 2015, 16; Janhunen ym. 2015, 21.)

Maaperämalli on osa lähtötietomallia, jota täydennetään hankkeen edetessä. Lähtötietomallilla tarkoitetaan sovittuun kansiorakenteeseen tallennettuja digitaalisia aineistoja. Lähtötietomallissa ei siis ole kyse esimerkiksi rakenteiden tai maaperän mallintamisesta kolmiulotteiseksi kappaleeksi, vaan tiedonhallinnasta. Maaperämallin lisäksi muita lähtötietomalliin kuuluvia aineistoja voivat olla esimerkiksi maastomalli sekä mallit nykyisistä rakenteista. Myös viiteaineisto, kuten viranomaisluvut ja -päätökset ovat osa lähtötietomallia. (Liukas & Kempainen 2015, 6; Liukas & Virtanen 2015, 9.)

Lähtötietomallissa, kuten tietomallipohjaisessa suunnitteluprosessissa yleensäkin, aineistojen luotettavuudelle ja tarkkuudelle asetetaan suuri painoarvo. Tästä syystä aineistojen alkuperä- ja metatiedot tulee liittää osaksi lähtötietomallia. Maaperämallin tarkkuus ja tulkintaperusteet kerrotaan lähtötietomallista laadittavassa malliselostuksessa. Malliselostusta tulee ylläpitää suunnitteluprosessin aikana. (Liukas & Kempainen 2015, 6; Liukas & Virtanen 2015, 9; Janhunen ym. 2015, 22.)

Lähtötietomallissa erotetaan alkuperäinen muokkaamaton lähtötieto lopullisista käyttöä varten muokatuista lähtötiedoista. Aineistojen erottelu tehdään kansiorakenteen avulla, joka on esitetty kuvassa 6. Alkuperäinen muokkaamaton aineisto tallennetaan ”RAAKA-AINE”-kansioon alle ja muokattu aineisto ”LAHTOTIETO”-kansioon. Toisen ja kolmannen tason alakansioiden nimiä ei ole vakioitu, joten ne voidaan nimetä hankkeen tarpeiden mukaisesti. (Liukas & Virtanen 2015, 6, 7, 12.)



KUVA 6. Yleisissä inframallivaatimuksissa kuvattu lähtötietomallin kansiorakenne.

Pohjatutkimuksia tulee tehdä suunnittelun eri vaiheissa siten, että niiden tarkkuus vastaa suunnitteluvaiheen vaatimuksia. Tutkimuksissa noudatetaan yleisiä tai tilajaakohtaisia ohjeita. Maaperätutkimuksien siirtämiseen käytetään kansallista Infra -pohjatutkimusformaattia ja maalajirajapintojen siirtoon Inframodel -formaattia. (Liukas & Kemppainen 2015, 11; Liukas & Virtanen 2015, 16; Janhunen ym. 2015, 14.)

Valmis maaperämalli on tarkistettava virheiden varalta. Suoritettavat tarkastustoimenpiteet ovat:

- visuaalinen tarkistus
- kolmioinnin tarkistus
- leikkausten läpikäynti ja vertailu pohjatutkimuksiin
- korkeus- ja syvyyskäyrien muodostus ja tarkistus
- maalajirajapintojen ja kallionpinnan rajapintojen törmäys- sekä leikkaustarkastelut. (Liukas & Virtanen 2015, 20.)

Maaperätiedot ovat varhaisessa suunnitteluvaiheessa yleensä hyvin suurpiirteisiä, mutta epätarkkojenkin lähtötietojen avulla voidaan penger- ja leikkausmassojen suuruusluokkaa saada arvioitua. Tie-, katu- ja ratasuunnitteluvaiheessa maastomallin on oltava niin tarkka, että suunnittelu ja määrälaskenta voidaan tehdä luotettavasti. Maaperämalli tulee puolestaan määrittää pohjatutkimusten mahdollistamalla tarkkuudella. Rakennussuunnitteluvaiheessa pohjatutkimuksia on oltava riittävästi maaperämallin tekemiseen. Massojen laskentaa varten maalajikerrokset tulisi mallintaa jatkuvina pintoina niin, että rakenteisiin kelpaavat maalajit voidaan erottaa rakenteisiin kelpaamattomista maalajeista. (Ruuti, Janhunen & Pienimäki 2015, 12–14.)

5 MAAPERÄMALLIEN LUOTETTAVUUTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

5.1 Yleistä

Samasta aineistosta mallinnetun maaperämallin tarkkuus ja luotettavuus vaihtelee riippuen sen tekijästä (Fufa 2004, 12). Luotettavuuteen ja tarkkuuteen vaikuttavat tekijän ammattitaito, tekijän kohdetuntemus, käytetty menetelmä sekä muut seikat, joiden vaikutusta voi olla hankala todentaa tai arvioida. Tässä kappaleessa on esitetty sellaisia maaperämallin luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä, jotka ovat helposti todettavissa, vaikka niiden tarkkaa vaikutusta maaperämallin luotettavuuteen olisikin hankala arvioida.

5.2 Havaintojen tiheys ja alueellinen kattavuus

Tyypillisesti tutkittavalla alueella havaintopisteet ovat keskitetty tärkeimmille alueille. Tämä johtaa siihen, että vain pientä osaa mallista voidaan lähtökohtaisesti pitää luotettavana, vaikka koko alue olisikin esitetty yhtenäisenä mallina. (Burrough & McDonnell 1998, 104.)

Vaikka havaintopisteiden tiheyttä voidaankin käyttää yleisesti mallin luotettavuuden arviointiin, ei sen avulla kuitenkaan voida absoluuttisesti määritellä mallin luotettavuutta. Hollannissa tehdyssä tutkimuksessa (Burrough 1983) tutkittiin maaperän kerrosrakennetta moniasteisen otannan menetelmällä. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, millä havaintopisteiden välimatkalla tulosten varianssi alkaisi merkittävästi kasvamaan. Tutkimuksessa todettiin, että havaintopistevälin laskeminen 200 metristä 20 metriin ei merkittävästi tuonut lisätietoa tutkitun lentohiekkakerrostuman kerrosrakenteesta. Sen sijaan hiekkakerroksen alapuolista savimoreenikerrosta ei pystytty luotettavasti kuvaamaan edes 20 metrin havaintopistevälillä. Näin voidaan todeta, että tarvittava havaintopisteiden tiheys on riippuvainen maaperän spatiaalisen vaihtelun suuruudesta, eli siitä, miten heterogeenista maaperä on. (Burrough & McDonnell 1998, 105.)

5.3 Havaintojen ikä

On harvinaista, että kohteen kaikki tutkimukset ja mittaukset olisivat tehty samaan aikaan. Tarkasteltaessa mittausten luotettavuutta on huomioitava, että mittausten luotettavuus heikkenee ajan myötä. Syitä luotettavuuden heikkenemiseen ovat esimerkiksi ihmisen ja luonnon aiheuttamat muutokset maaperään, mittalaitteiden tarkkuuden kehittyminen, käytettyjen standardien ja järjestelmien muuttuminen sekä vanhojen tulosten digitoinnissa tapahtuvat virheet. (Burrough & McDonnell 1998, 104.)

Tyypillinen esimerkki havaintojen iän aiheuttamasta virheestä on maanpinnan kohoaminen, jonka vuoksi Suomessa on käytössä useita korkeusjärjestelmiä. Pisteelle määritetystä korkoarvosta ei pystytä ilman metatietoja tunnistamaan missä korkeusjärjestelmässä korko on ilmoitettu. Geodeettisen laitoksen mukaan (2009a; 2009b) esimerkiksi Vaasan seudulla ero Suomessa käytettävien korkeusjärjestelmien välillä on yli puoli metriä.

5.4 Havaintojen merkittävyys

Mallinnettaessa käytetään usein tuloksia, jotka eivät suoraan anna tietoa halutusta ominaisuudesta, mutta joita siitä huolimatta käytetään kuvaamaan haluttua ominaisuutta (Burrough & McDonnell 1998, 105). Tällaisia mittaustuloksia voivat olla esimerkiksi paino- tai heijarikairauksesta saadun tiiviin maakerroksen sijainnin käyttäminen kuvaamaan kallionpinnan sijaintia tai kenttäkokeiden antamien tulosten käyttäminen kuvaamaan haitta-ainepitoisuutta maaperässä. Jos parempaa tietoa ei ole käytettävissä, on toissijaista tietoa usein järkevä käyttää mallissa, jotta havaintopisteiden tiheydestä saadaan riittävä. Toissijaisten havaintojen käyttämisessä on kuitenkin huomioitava, että havainnot on kalibroitava huolellisesti vertaamalla niitä luotettavilla menetelmillä saatuihin tuloksiin (Burrough & McDonnell 1998, 106).

5.5 Sijainti- ja ominaisuustiedon tarkkuus

Tyypillisesti moderneilla mittalaitteilla pystytään maanpinnalla olevan pisteen sijainti määrittelemään senttimetrin tarkkuudella. Näin erityisesti korkotiedon luotettavuus

den osalta ongelmaksi muodostuu muilla menetelmillä määritettyjen maaperän ominaisuuksien syvyydestä kyseisessä havaintopisteessä. Maalajien rajapinnan sijaintitarkkuuteen vaikuttavat käytetyn menetelmän ja tulkitsijan ammattitaidon lisäksi myös se, että rajapinta ei välttämättä ole selvärajainen, jollaisena se kuitenkin yleensä pyritään esittämään (Burrough & McDonnell 1998, 106).

Sijaintitiedon lisäksi maaperästä voidaan mitata lukematon joukko erilaisia ominaisuustietoja, joiden tarkkuuteen vaikuttavat muun muassa käytetyn menetelmän tarkkuus ja mittalaitteen kunto. Vaikka laboratorioanalyysillä saadaankin kenttähavaintoja ja -mittauksia tarkempia tuloksia, liittyy niihinkin tietty epävarmuus. Käytetyn menetelmän ja mittalaitteen tarkkuutta voidaan tarkkailla esimerkiksi nollanäytteillä, jaetuilla näytteillä, rinnakkaisnäytteillä, toistetulla näytteenotolla sekä taustapitoisuusnäytteillä. (Burrough & McDonnell 1998, 106; Lepistö ym. 2014, 45.)

5.6 Lähtötietoaineiston mittakaava

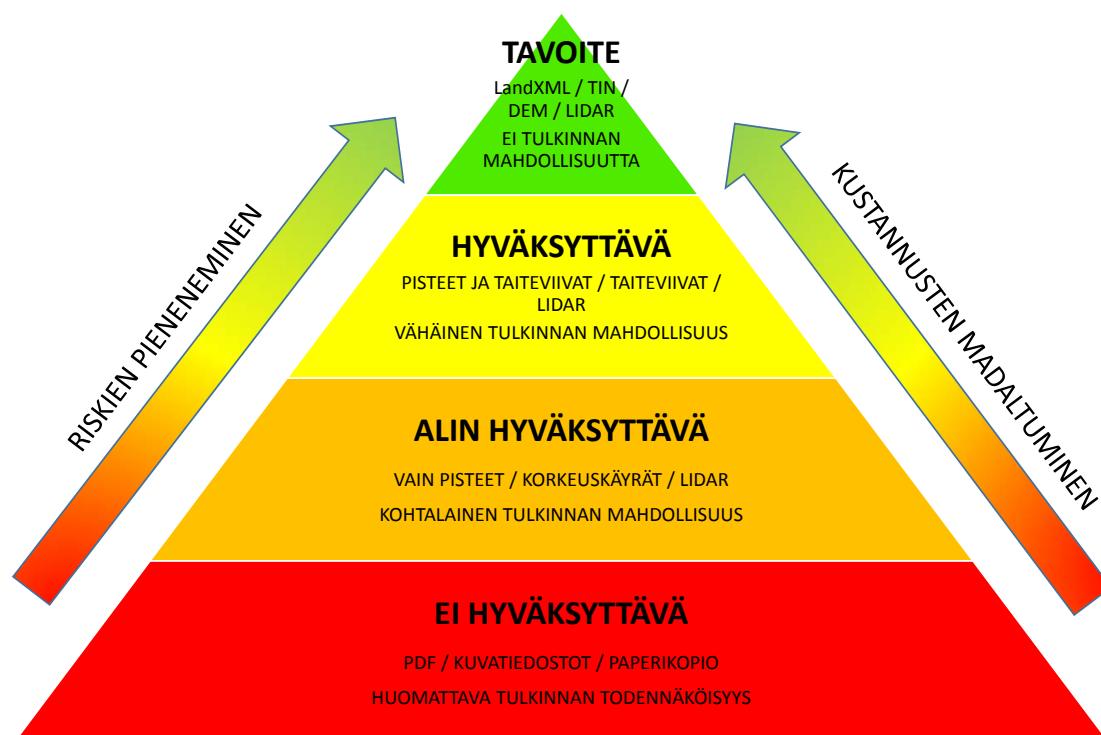
Maaperämallien lähtötietoina käytettäviä paikkatietoaineistoja ja karttoja ei tulisi käyttää niiden ominaisresoluutiota ja -mittakaavaa tarkempaan tarkasteluun. Vektorimuotoinen aineisto voi näyttää näennäisesti tarkalta, jos sitä tarkastellaan esimerkiksi suunnitteluohjelmassa. Kuitenkin, esimerkiksi Geologian tutkimuskeskuksen vektorimuotoiset maaperäaineistot ovat tarkimmillaankin esitetty 1:20 000 mittakaavassa, jolloin niiden tarkkuus ei välttämättä riitä esimerkiksi yksittäisen kiinteistön maaperän pintakerrosten tarkasteluun (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007, 5). Kyseinen mittakaava tarkoittaa käytännössä sitä, että hehtaarin kokoista aluetta tarkastellaan 0,25 cm² alana.

Myös korkeus- ja syvyyskäyrät ovat tietystä aineistosta tehtyjä kartografisia esityksiä, joiden tarkoitus on havainnollistaa topografiaa siten, että tieto on visuaalisesti tulkittavissa. Tällaista pitkälle prosessoitua aineistoa on ongelmallista käyttää mallinnuksessa. Aineistoista tulisi hankkia alkuperäinen mittaustieto metatietoineen, jolloin on mahdollista arvioida sen soveltuvuutta mallintamiseen.

5.7 Tiedonsiirto

Mittaustietoja ja malleja on usein tarpeellista siirtää eri toimijoiden välillä, jolloin on varmistettava, että tiedonsiirrosta ei aiheudu ongelmia tiedon luotettavuuteen ja käytettävyyteen. Käytetyllä tiedostomuodolla on suora yhteys siihen, miten tieto on käytettävissä myöhemmin ja miten muut pystyvät sitä hyödyntämään (Stanford University Libraries 2017).

Tiedonsiirron ongelmia rakennushankkeissa selvitettiin VTT:n tutkimuksessa vuonna 2003. Tutkimuksen loppuraportin (VTT 2003, 4) mukaan tiedonsiirrosta aiheutuvat ongelmat kuluttavat ohjelmistotoimittajien mukaan 10–30 % ja rakennusosalalla toimivien konsulttien mukaan 1–15 % työajasta. Työajan menetyksen lisäksi tiedon muuntuminen ja tiedon tulkinnan mahdollisuus voivat aiheuttaa hankkeelle kustannuksia ja riskejä. Kuvassa 7 on luokiteltu tiedostomuotoja ja -tyyppejä sen mukaan, miten yksiselitteisesti pintamalli voidaan niiden perusteella muodostaa. Kuvassa LiDAR, eli laserkeilausaineisto, on esitetty kolmella eri tasolla. Laserkeilausaineiston käytettävyyteen vaikuttavat muun muassa sen luokittelu- ja sijaintitiedon tarkkuus sekä pistetiheys (Global CADD Standards 2013, 72).



KUVA 7. Pintamalleihin käytettävän tiedostomuodon vaikutus hankkeen kustannuksiin ja riskeihin (mukailtu Global CADD Standards 2013, 72).

Tiedostomuodon aiheuttamia ongelmia on pyritty ratkaisemaan Suomessa käyttämällä pohjatutkimustulosten siirtoon avointa Infra -pohjatutkimusformaattia ja sen edeltäjiä (SGY 2015, 3, 5). Lisäksi avoimen LandXML-pohjaisen Inframodel-formaatin käyttö on yleistymässä, jonka myötä myös muita tietoja saadaan siirrettyä avoimessa, eri ohjelmistoissa toimivissa tiedostomuodossa. (Liukas & Kemppainen 2015, 6). Mikäli tietoa ei ole mahdollista siirtää näissä tiedostomuodoissa, tulisi valittavan tiedostomuodon olla:

- avoin
- maksuton
- salaamaton
- pakkaamaton
- yleisesti käytössä oleva
- useilla ohjelmistoilla toimiva
- avoimia standardeja kehittävän organisaation ylläpitämä (Stanford University Libraries 2017).

6 TUTKIMUKSEN SUORITUS

6.1 Yleistä

Työhön liittyvän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää havaintopisteiden välimatkan vaikutusta kallionpintamallin luotettavuuteen sekä arvioida kalliopinnan spatiaalista vaihtelua. Havaintopisteiden välimatkan vaikutusta kallionpintamallin luotettavuuteen tutkittiin vertailemalla laserkeilausaineistosta mallinnettuja pintamalleja erisuuruksilla havaintopisteväleillä luotuihin pintamalleihin. Kalliopinnan spatiaalista vaihtelua arvioitiin paikkatietanalyysillä, jossa selvitettiin kalliopinnan korkeuden muutos suhteessa etäisyyteen.

Kattavan pohjatutkimusaineiston kerääminen tutkimusta varten osoittautui haastavaksi. Mahdollisia laajahkoja aineistolähteitä tutkimusta varten olisivat olleet esimerkiksi Helsingin kaupungin Soili-palvelu sekä Geologian tutkimuskeskuksen ja Liikenneviraston kehittämä valtakunnallinen pohjatutkimusrekisteri. Näiden aineistojen perusteella olisi kuitenkin ollut mahdotonta luoda referenssipintoja, johon pohjatutkimusaineistosta mallinnettuja maaperämalleja olisi voitu verrata. Tästä syystä aineistoksi valittiin Maanmittauslaitoksen avoin laserkeilausaineisto, joka rajattiin Maanmittauslaitoksen maastotietokannan ja ortokuvatarkastelun perusteella avokallioalueille. Näin aineistosta saatiin laajoja ja yhtenäisiä kallionpintaa kuvaavia referenssiaineistoja. Lisäksi aineistosta luotiin keinotekoisia havaintopisteitä erisuuruksilla systemaattisilla havaintopisteväleillä, jotta havaintopisteiden välimatkan vaikutusta kallionpintamallin luotettavuuteen voitiin arvioida.

6.2 Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto

Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto on osasta Suomea saatavissa oleva maanpintaa ja maanpinnalla olevia kohteita kuvaava kolmiulotteinen pistemäinen aineisto. Jokaisella pisteellä on sijaintitiedon lisäksi luokitustieto. Automaattisesti prosessoituja luokkia ovat muun muassa kasvillisuus-, virhe- ja maanpintapistet. Lisäksi aineistoa luokitellaan stereomalliavusteisesti, jolloin luokkia ovat edellisen lisäksi muun muassa vesistö- ja silta-pisteet. (Maanmittauslaitos 2017.)

Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston pistetiheys on vähintään 0,5 pistettä/m² (Maanmittauslaitos 2017). Tiheys on siis huomattavasti harvempi kuin tyypillisesti rakennuskohteissa suoritettu laserkeilaus. Tutkimuksessa kuitenkin oletettiin, että aineiston erottelukyky riittää kuvaamaan luonnollisen kalliopinnan spatiaalista vaihtelua rakennushankkeissa vaaditulla tarkkuudella.

Laserkeilausaineistosta valittiin työhön karttalehtiä, joilla on runsaasti laajoja yhtenäisiä avokallioalueita ja joissa maankäyttö vaikutti karttatarkastelun perusteella vähäiseltä. Avokallioalueiden etsimiseen käytettiin Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan avokallioalueiksi luokiteltuja alueita. Lopulliset alueet valittiin ortokuvatarkastelun perusteella siten, että niissä oli mahdollisimman vähän kasvillisuutta. Valituilta alueilta käytettiin työssä vain sellaisia pisteitä, jotka olivat luokiteltu kuvaamaan maanpintaa.

Aineiston määrä rajattiin kymmeneen karttalehteen, jotka kattavat yhteensä 90 km². Alueita pyrittiin valitsemaan ympäri Suomea, mutta laserkeilausaineiston kattavuudesta johtuen alueet painottuivat eteläiseen Suomeen. Aineiston lopulliseksi tiheydeksi tuli noin 1,3 pistettä/m², kun alkuperäisestä aineistosta poistettiin muut kuin maanpintaa kuvaavat pisteet. Paikallisesti aineiston tiheys oli suurempi, sillä avokallioalueilla suurin osa pisteistä kuvaa maanpintaa.

6.3 Tutkimuksessa käytetyt ohjelmistot

Autodeskin kehittämä AutoCAD Civil 3D (myöhemmin C3D) on maailmanlaajuisesti tarkasteltuna yhdyskuntasuunnittelualan johtava tietomallinnusohjelmisto (Roberts & Medley 2016, 2). Ohjelmistolla on mahdollista tehdä tyypillistä yhdyskuntateknistä suunnittelua mallipohjaisesti. Lisäksi ohjelmistolla voidaan tehdä näihin liittyviä analyysejä, kuten valuma- ja tulva-alue tarkasteluja, vesi- ja viemäriverkostojen hydraulista mallintamista sekä leikkauksiin ja tasauksiin liittyvää määrälaskentaa ja optimointia (Autodesk 2017).

ArcGIS on Esrin kehittämä paikkatieto-ohjelmistojen markkinajohtaja (Esri 2015). Ohjelmisto koostuu erillisistä ohjelmista ja moduuleista, jotka mahdollistavat paikkatietoaineiston monipuolisen käsittelyn, analysoinnin ja visualisoinnin (Antikainen & Kortsalo 2012).

Earth Volumetric Studio -ohjelmisto (myöhemmin EVS) on sitä kehittävän C Tech -yhtiön mukaan johtava tilavuusmallinnusohjelmisto geotieteen alojen tarpeisiin. Ohjelmistolla voidaan mallintaa ja visualisoida monipuolisesti paikkaan sidottuja mittauksia erilaisissa ympäristöissä, kuten maaperässä, pinta- ja pohjavedessä sekä ilmassa (C Tech 2016).

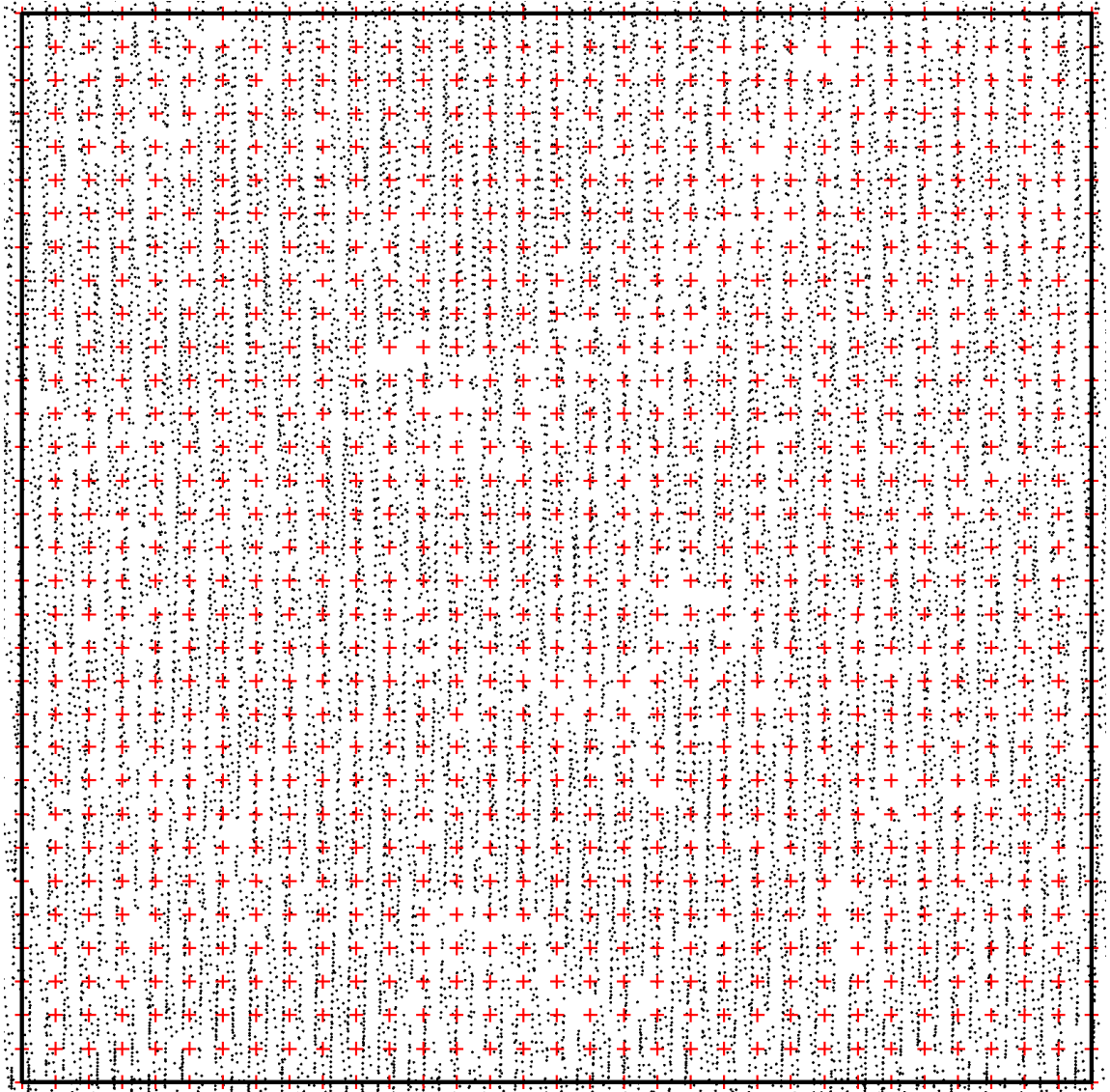
6.4 Aineiston käsittely

Aineistoa käytettiin kahdentyyppiseen tarkasteluun. Ensimmäisessä analyysissä pyrittiin selvittämään havaintopisteiden välimatkan vaikutusta kallionpintamallin luotettavuuteen tarkastelemalla kahtakymmentä topografialtaan erityyppistä 2,56 hehtaarin ($160 \text{ m} \times 160 \text{ m}$) kokoista aluetta.

Analyysiä varten jokaisesta alueesta muodostettiin laserkeilausaineiston mukainen referenssipinta C3D -ohjelmistossa. Lisäksi jokaisesta alueesta muodostettiin vertailupinta 40, 20, 10 ja 5 metrin systemaattisella havaintopistevälillä. Vertailupintojen havaintopisteiden korko määritettiin referenssipinnoista. Vertailupinnat muodostettiin kolmiomallane C3D -ohjelmistossa sekä interpoloimalla ne FastRBF -menetelmällä kahden metrin ruutuverkkoon EVS -ohjelmiston avulla. Käytetty menetelmä valittiin muutaman testilaskennan jälkeen, sillä se antoi EVS -ohjelmiston interpolointivaihtoehtoista parhaimman tuloksen tarkasteltaessa referenssi- ja vertailupinnan välistä keskimääräistä eroa. EVS -ohjelmistolla interpoloidut pintamallit tuotiin C3D -ohjelmistoon aineistojen analysointia varten. Kun jokaiselta alueelta tehtiin neljä vertailupintaa kahdella eri menetelmällä, oli vertailupintojen kokonaismäärä analyysissä 160 kappaletta. Kuvassa 8 on esitetty erään alueen laserkeilausaineisto mustina pisteinä sekä 5 metrin välein sijoitetut havaintopisteet punaisina risteinä.

Referenssi- ja vertailupinnoista mallinnettiin C3D -ohjelmistolla tilavuuspinnat. Tilavuuspinnnoista koostettiin Excel-taulukko, johon kerättiin vertailtavien pintojen välinen

keskimääräinen ero sekä pintojen minimi- ja maksimiero metreissä. Tarkempia tilastollisia tunnuslukuja aineistosta ei C3D -ohjelmistolla saatu, mutta pintamallien luotettavuuden arvioimiseksi tilavuuspinnosta tilastoitiin pinta-alojen osuudet, joissa vertailupinnat olivat raja-arvoiksi valittujen etäisyyksien sisällä referenssipinnoista.



KUVA 8. Esimerkki laserkeilaus- ja havaintopisteaineistosta.

Toisessa analyysissä pyrittiin selvittämään kalliopinnan spatiaalinen vaihtelu tutkimusta varten kerätyn aineiston osalta. Analyysia varten aineistoa ei rajattu mitenkään, vaan siihen otettiin mukaan kaikki kalliopintahavainnot 90 km² käsittävästä aineistosta. Pisteille laskettiin ArcGIS -ohjelmistolla etäisyys ja korkeuden muutos satunnaisesti valittuihin pisteisiin 25 metrin säteellä. Lopputuloksena syntyi noin miljoona pistettä käsittävä aineisto. Esimerkki aineistosta on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Esimerkki ArcGIS -ohjelmistolla luodusta aineistosta.

X	Y	Etäisyys [m]	Z LAS [mmpy]	Z Vert. [mmpy]	ΔZ [m]
443000.0	7383974.9	21.4	203.5	201.9	-1.6
442990.9	7383979.7	24.8	202.8	201.2	-1.5
442992.7	7383979.6	24.8	202.9	201.2	-1.6
442994.4	7383979.5	24.8	203.0	201.2	-1.8
442996.1	7383979.4	25.0	203.1	201.2	-1.8
442999.9	7383978.3	24.8	203.6	201.9	-1.7
442998.2	7383978.4	24.4	203.3	201.2	-2.0
442996.4	7383978.5	24.1	203.2	201.2	-2.0
442994.7	7383978.6	23.9	203.0	201.2	-1.7
442993.0	7383978.7	23.8	202.9	201.2	-1.6
442991.3	7383978.8	23.9	202.8	201.2	-1.5
442989.6	7383978.9	24.1	202.6	201.2	-1.4
442987.9	7383979.0	24.4	202.2	201.2	-1.0
442986.1	7383979.1	24.8	202.0	201.2	-0.8
442983.6	7383978.2	24.6	201.6	201.2	-0.4
442985.3	7383978.1	24.1	201.8	201.2	-0.5
442987.1	7383978.0	23.6	202.0	201.2	-0.8
442988.8	7383978.0	23.2	202.4	201.2	-1.1
442990.5	7383977.9	23.0	202.7	201.2	-1.4

Aineisto vietiin taulukkomuodossa Access-tietokantaan, jossa se luokiteltiin etäisyyden mukaan 10 senttimetrin välein. Näin 25 metrin säteellä havainnoiduista pisteistä saatiin yhteensä 250 luokkaa. Tietokannasta suoritettiin kyselyt siten, että jokaisesta luokasta saatiin laskettua maksimi- ja keskiarvo, keskihajonta, yläkvartiili, mediaani ja alakvartiili.

Access-tietokannassa kyselyiden avulla lasketut arvot siirrettiin kuvaajien piirtämistä varten Excel-taulukkoon, jossa laskettiin lisäksi jokaisesta luokasta keskiarvon odotusarvon 95 %:n luottamusväli.

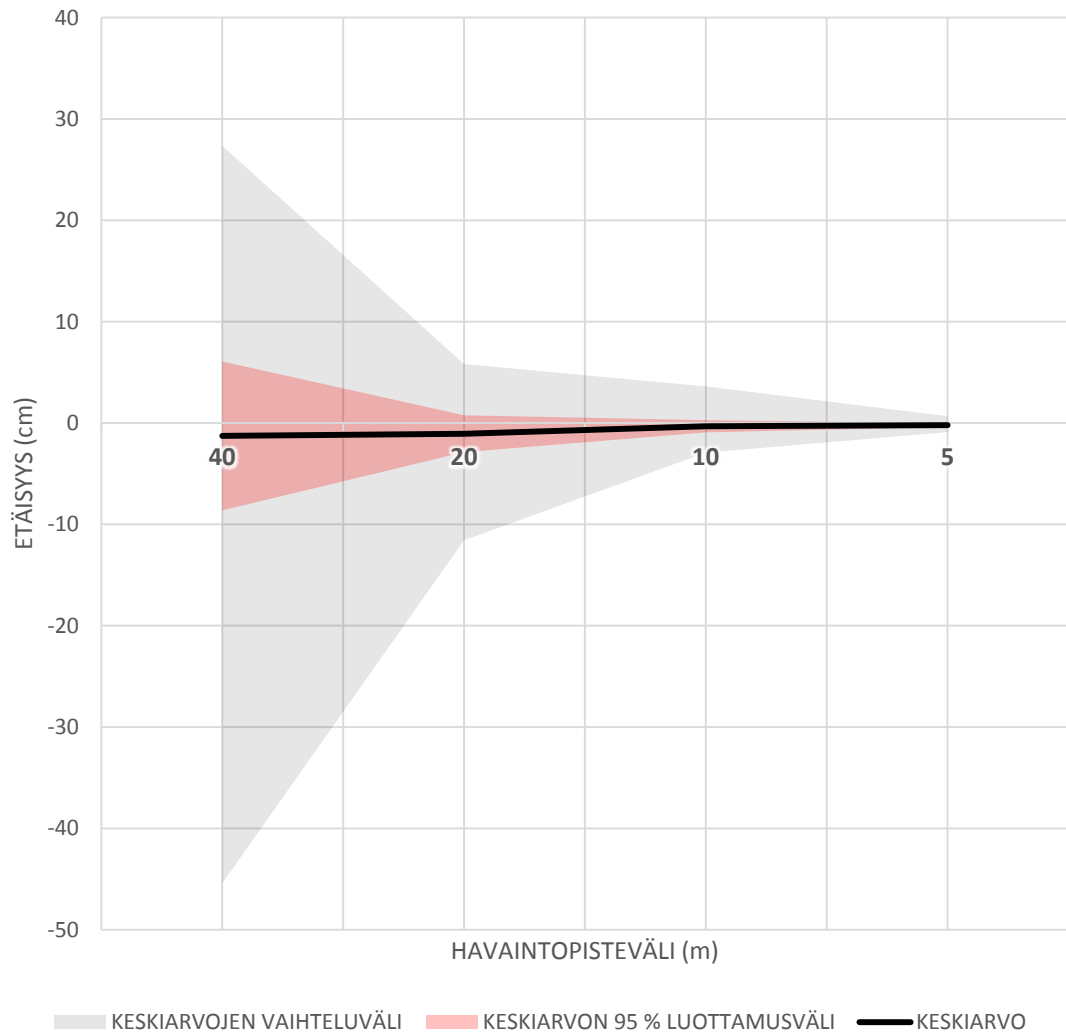
7 TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA

7.1 Havaintopistevälin vaikutus kallionpintamallin luotettavuuteen

Havaintopistevälin vaikutusta kallionpintamallin luotettavuuteen tutkittiin tuottamalla tilavuuspintamallit C3D -ohjelmassa eri havaintopisteväleistä mallinnettujen vertailupintojen ja laserkeilausaineistosta mallinnettujen referenssipintojen välille. Tilavuuspintamalleista määritettiin ääriarvot, keskiarvo, keskiarvojen keskihajonta (s), keskiarvon odotusarvo 95 % luottamusvälille sekä keskiarvojen ääriarvot. Taulukossa 5 esitetyissä tuloksissa on eroteltu kolmioverkkomalleista (TIN) ja FastRBF -menetelmällä interpoloiduista ruutuverkkomalleista (GRID) saadut tulokset. Keskiarvot, niiden vaihteluväli sekä keskiarvojen odotusarvon 95 %:n luottamusväli eri havaintopisteväleillä on esitetty kuviossa 1.

TAULUKKO 5. Tilavuuspintamallien tunnuslukuja.

Havaintopisteväli [m]	40	20	10	5
Min TIN [m]	-9,33	-4,88	-4,23	-2,38
Min GRID [m]	-9,66	-4,31	-3,52	-2,27
Max TIN [m]	5,87	3,79	3,42	1,88
Max GRID [m]	5,98	3,26	3,38	2,49
Ka, TIN [cm]	-1,28	-1,06	-0,32	-0,21
Ka, GRID [cm]	-1,37	-1,53	-0,24	-0,16
Ka, s TIN [cm]	15,70	3,89	1,29	0,37
Ka, s GRID [cm]	16,36	4,26	1,17	0,38
Ka, 95 %:n luottamusväli TIN [cm]	7,35	1,82	0,60	0,17
Ka, 95 %:n luottamusväli GRID [cm]	7,66	1,99	0,55	0,18
Ka, Min TIN [cm]	-45,43	-11,58	-2,93	-0,90
Ka, Min GRID [cm]	-38,85	-10,61	-1,72	-1,01
Ka, Max TIN [cm]	27,36	5,82	3,61	0,67
Ka, Max GRID [cm]	37,42	6,92	3,09	0,70

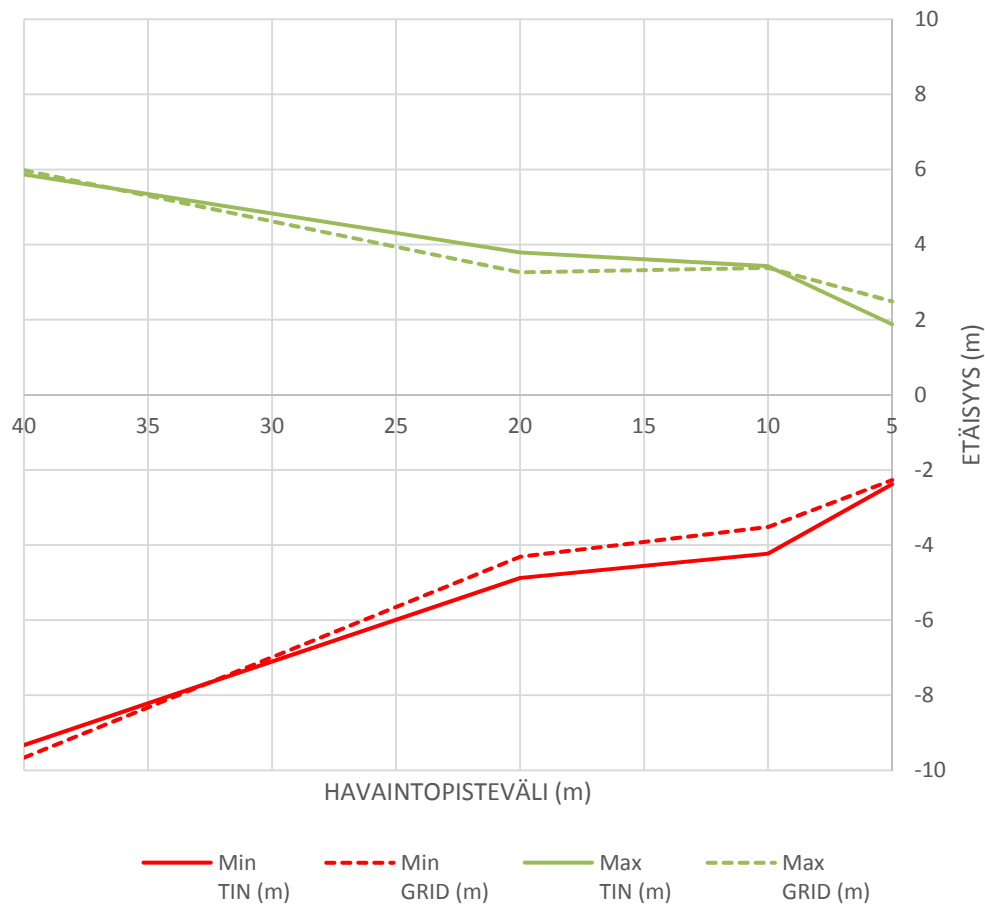


KUVIO 1. Havaintopistevälin vaikutus tilavuuspintamallien keskiarvoon.

Tuloksista voidaan havaita, että tilavuuspintojen keskiarvo oli havaintopistevälistä riippumatta alle 1,3 cm. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi 1 000 m² alueella tilavuus olisi poikennut keskimäärin alle 13 m³ riippumatta havaintopistevälistä. Tuloksista huomataan myös, että havaintovälin tihentäminen 40 metristä 20 metriin pienentää määrällisesti eniten keskiarvojen vaihteluvälin sekä keskiarvon 95 % luottamusvälin suuruutta. Suhteellisesti tarkasteltuna havaintovälin tihentäminen 10 metristä 5 metriin pienentää edellä mainittua arvoja lähes yhtä paljon.

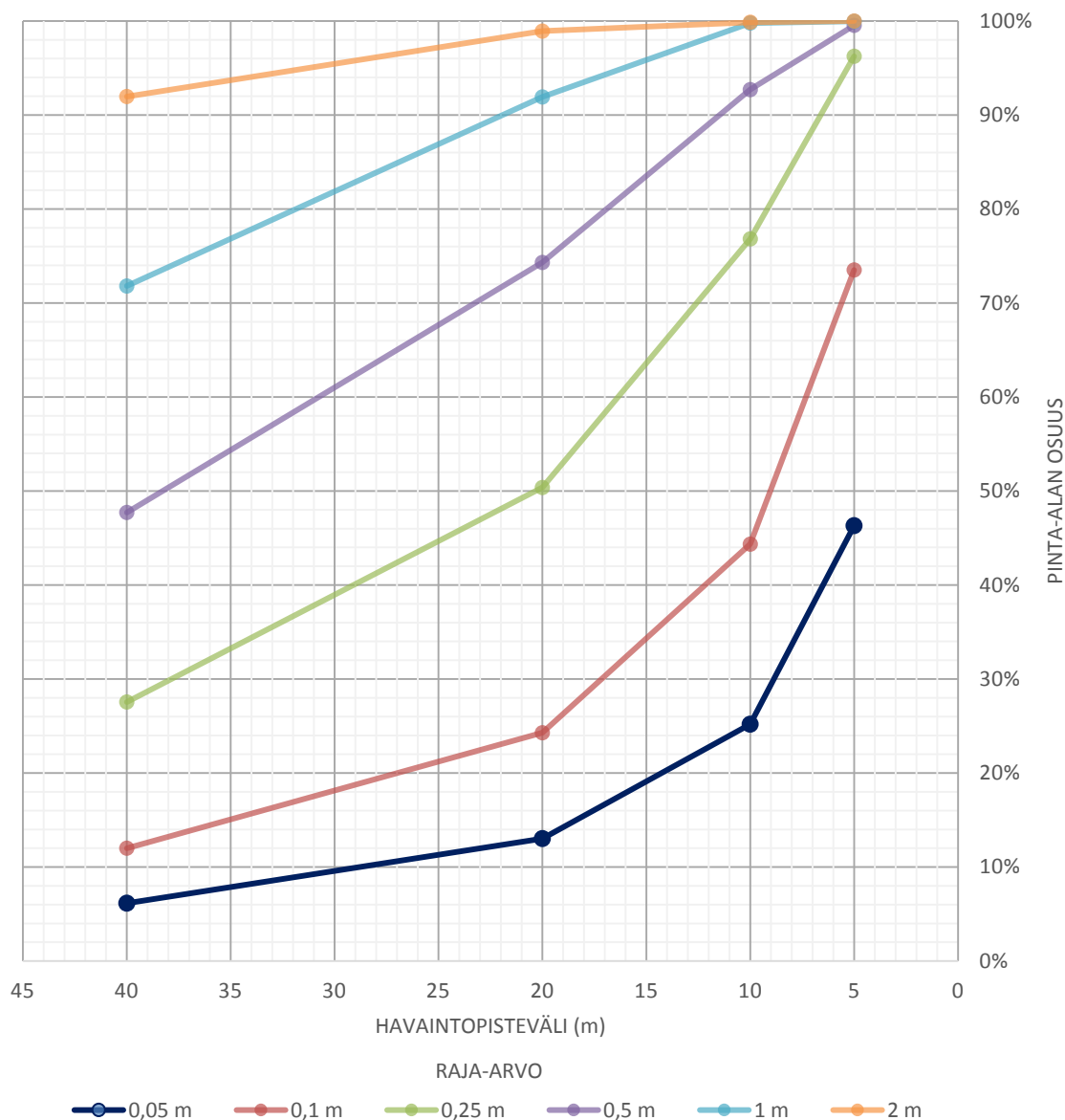
Mallinnusmenetelmien välillä ei näyttänyt olevan suurta merkitystä arvoihin. Tämän takia kuviossa 1 on esitetty vain kolmioverkkomalleista saadut tulokset, sillä menetelmän välisiä eroja ei pystytty selkeästi esittämään kuvion mittakaavassa. Yhteenvetona menetelmien välisistä eroista voidaan taulukossa 5 esitettyjen tunnuslukujen perusteella sanoa, että 40, 20 ja 5 metrin havaintopisteväleillä kolmioverkkomalli (TIN) kuvasi keskimäärin

hieman paremmin referenssipintaa. 10 metrin havaintopistevälillä puolestaan kahden metrin ruutuverkkoon interpoloidut pintamallit (GRID) olivat keskimäärin luotettavampia. Kuitenkin, kun tarkastellaan kuviossa 2 esitettyjä tilavuuspintamallien ääriarvoja, voidaan niiden perusteella todeta ruutuverkkomallien tuottaneen keskimäärin parempia tuloksia. Kuviossa 2 on esitetty kolmioverkkomallien minimiarvot punaisella ja maksimiarvot vihreällä ehyellä viivalla. Ruutuverkkomallien vastaavat arvot ovat esitetty puolestaan katkoviivoin.



KUVIO 2. Havaintopistevälin vaikutus tilavuuspintamallien ääriarvoihin.

Havaintopisteistä mallinnettujen pintojen luotettavuutta arvoitiin myös selvittämällä kymmenestä tilavuuspintamallista sen pinta-alan osuus, jossa vertailupinta oli valittuja raja-arvoja lähempänä referenssipintaa. Raja-arvoiksi valittiin 0,05, 0,1, 0,25, 0,5, 1 sekä 2 metriä. Kuviossa 3 esitettyjen tulosten keskiarvot olivat kahden menetelmän välillä niin lähellä toisiaan, että kuviossa on esitetty vain kolmioverkkopinnoista lasketut arvot.



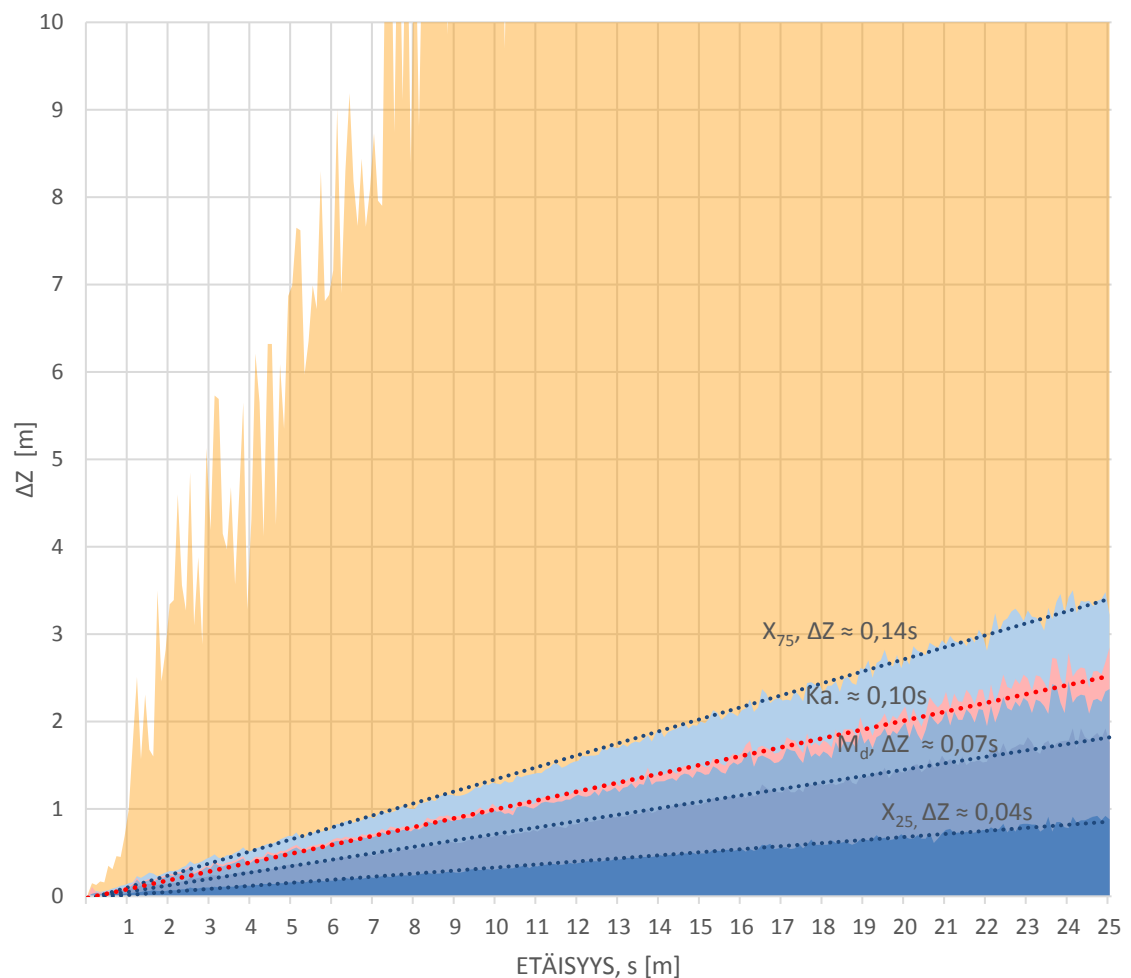
KUVIO 3. Havaintopistevälin vaikutus suhteelliseen pinta-alaan, jossa vertailu- ja referenssipinnat ovat tiettyä raja-arvoa lähempänä toisiaan.

Kuviosta 3 voidaan havaita, että vertailupintojen pinta-alasta 70 % on 10 senttimetrin sisällä referenssipinnasta, kun havaintopisteväli on noin 6 metriä. Vastaavaan pinta-alaosuuteen päästään 25 senttimetrin tarkkuudella, kun havaintopisteväli on noin 13 metriä. 50 senttimetrin tarkkuuteen riittäisi puolestaan noin 23 metrin havaintopisteväli. Lisäksi kuvion perusteella voidaan todeta, että 5 metrin havaintovälillä keskimäärin alle puolet mallinnettujen pintojen pinta-alasta on 5 senttimetrin sisällä todellisesta pinnasta. Kuvion perusteella voidaan siis karkeasti arvioida miten luotettavasti tietty havaintopisteväli kuvaa todellista pintaa. Jos esimerkiksi määrälaskennassa riittäisi metrin tarkkuus, päästäisiin siihen kuvion mukaan yli 90 %:n todennäköisyydellä käyttämällä 20 metrin havaintopisteväliä.

7.2 Kalliopinnan spatiaalinen vaihtelu

Tutkimusta varten kerätyn laserkeilausaineiston osalta pyrittiin arvioimaan kalliopinnan spatiaalista vaihtelua selvittämällä kalliopinnan korkeuden muutos suhteessa etäisyyteen.

Kuviossa 4 on esitetty etäisyyden mukaan luokitellun aineiston keskiarvon odotusarvon 95 %:n luottamusväli punaisella sekä yläkvartiiliin (X_{75}), mediaanin (M_d) ja alakvartiiliin (X_{25}) rajaama aineisto sinisen eri sävyillä. Aineiston maksimi-arvo on esitetty oranssina alueena. Keskiarvon sekä fraktiilien likimääräiset lineaariset kuvaajat ovat esitetty kuviossa pisteviivoilla.



KUVIO 4. Kalliopinnan korkeuden muutos suhteessa etäisyyteen.

Kuviosta selviää, että puolessa aineiston havaintopisteistä kalliopinnan korkeus muuttuu metrin matkalla 0,04...0,14 metriä. Kuviosta voidaan todeta myös, että 25 % pisteistä ovat sellaisia, missä muutos metriä kohden on yli 0,14 metriä ja 25 % sellaisia, joissa muutos on alle 0,04 metriä.

Kuvion perusteella voidaan todeta myös, että käytetyssä aineistossa kalliopinnan korkeuden muutosta suhteessa etäisyyteen voidaan kuvata lineaarisesti. Esimerkiksi keskiarvo voidaan esittää likimäärin yhtälöllä (1):

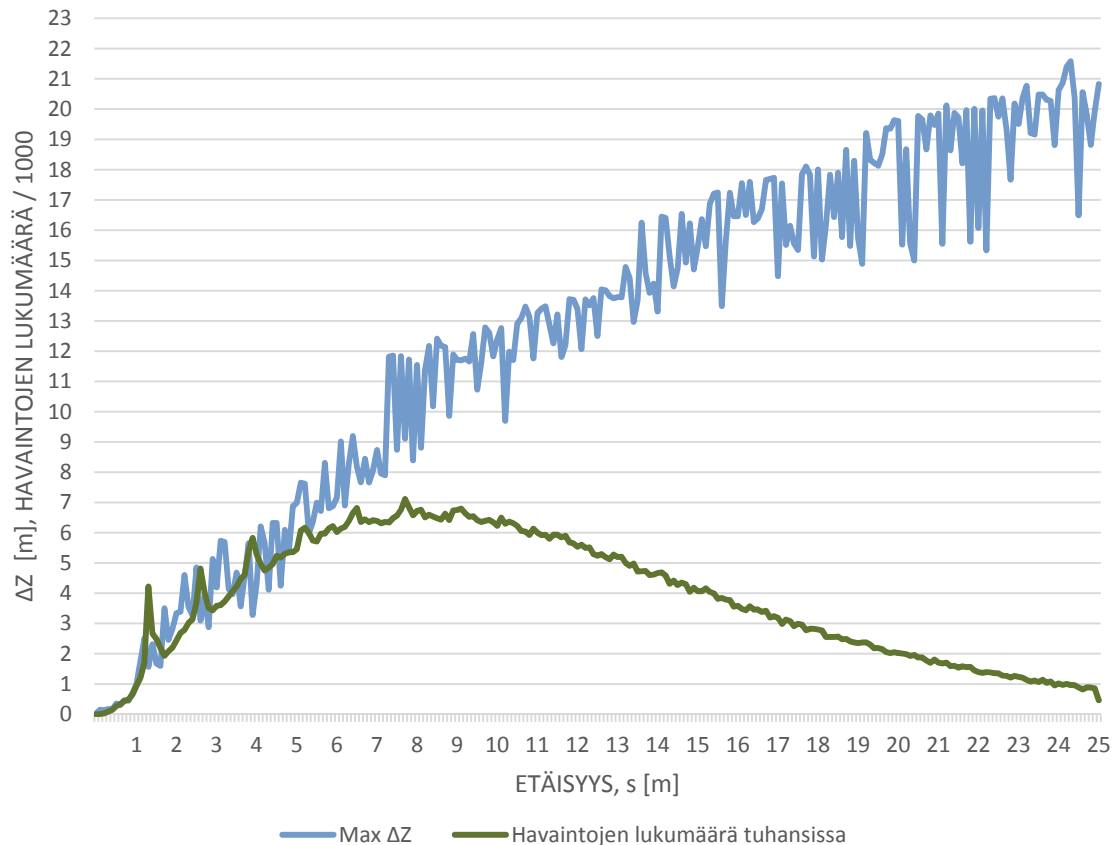
$$\Delta Z_{ka} = 0,1s, \quad (1)$$

missä

ΔZ_{ka} on kalliopinnan korkeuden keskimääräinen muutos suhteessa etäisyyteen [m]

s on etäisyys [m].

Kuviossa 5 on esitetty kalliopinnan korkeuden maksimimuutos suhteessa etäisyyteen sekä havaintojen lukumäärä tuhansissa. Kuvioista voidaan havaita, että aineiston maksimimuutosta ei voida esittää lineaarisesti. Tämä voi johtua havaintojen lukumäärän epätasaisesta jakautumisesta eri etäisyysluokkien välille. Oletettavaa on, että mitä enemmän havaintoja luokissa on, sitä suurempia ovat niissä esiintyvät ääriarvot.

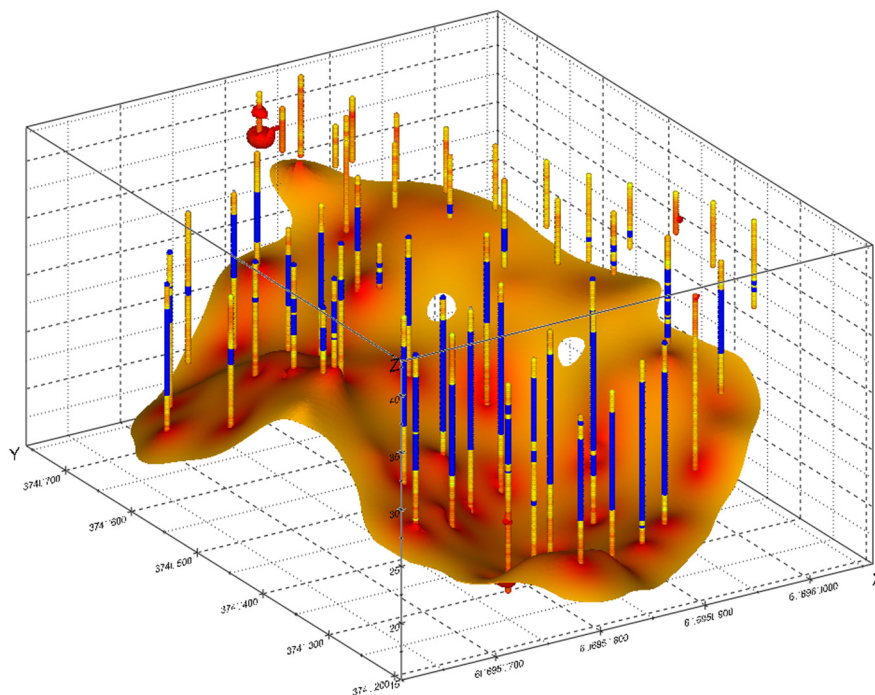


KUVIO 5. Kalliopinnan korkeuden maksimimuutos suhteessa etäisyyteen sekä havaintojen lukumäärä tuhansissa.

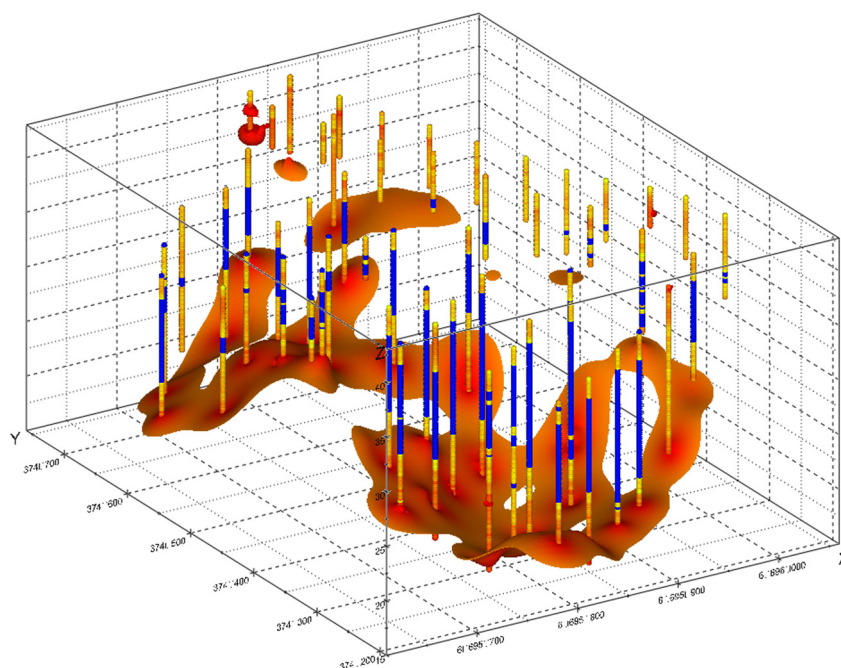
8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Maaperän mallintaminen ja maaperämalli ovat laajoja poikkitieteellisiä käsitteitä, joista suomenkielisen lähdekirjallisuuden löytäminen osoittautui haastavaksi. Varsinkin rakennustekniikan alalla maaperän ominaisuustietojen mallintaminen vaikutti olevan tuntematon käsite. Maaperän tilavuusmallia ja siihen mallinnettuja ominaisuustietoja voitaisiin käyttää myös rakennustekniikan alalla esimerkiksi pohjatutkimustuloksista saatujen tulosten alustavaan esittämiseen. Näin tuloksia olisi mahdollista havainnollistaa nopeasti, jolloin mallia olisi mahdollista käyttää esimerkiksi tutkimusten suunnitteluun ja rajapintojen tulkitsemisen apuna. Yhdistämällä eri menetelmillä saatuja tuloksia ja tarkastelemalla niitä kolmiulotteisen mallin avulla, tulosten tulkinta saattaisi olla tarkempaa myös toissijaisten havaintojen osalta. Tällaisesta mallista olisi mahdollista myös tuottaa maalaajien rajapintojen lisäksi suunnittelussa tarvittavien eri maaperän ominaisuusarvojen rajapintoja.

Kuvassa 9 on esitetty Geologian tutkimuskeskuksen pohjatutkimusrekisteristä ladattujen painokairaustulosten tiettyä puolikierroslukumäärää kuvaava rajapinta. Rajapintaa on rajattu siten, että näkyvän rajapinnan luotettavuus on yli 70 %. Kuvassa 10 on sama pinta rajattu 80 %:n luotettavuudella.



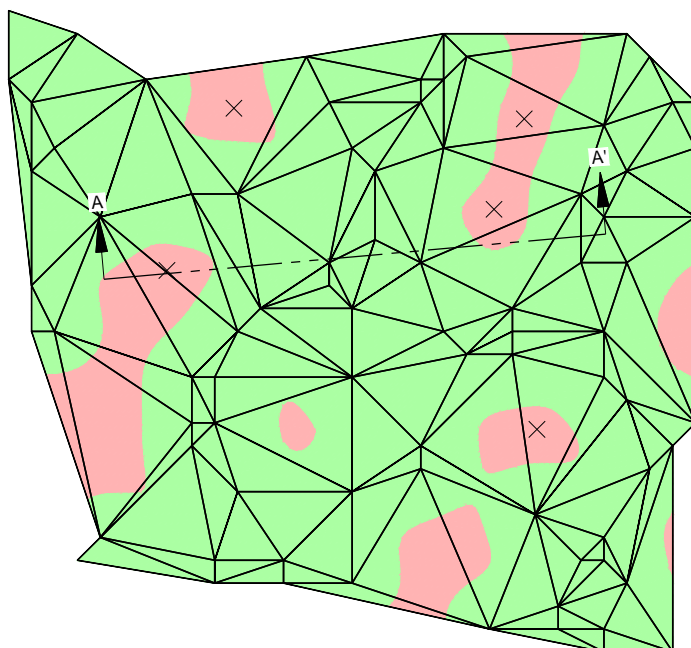
KUVA 9. Painokairausten tiettyä puolikierrosten lukumäärää kuvaava rajapinta rajattuna 70 % luotettavuudella.



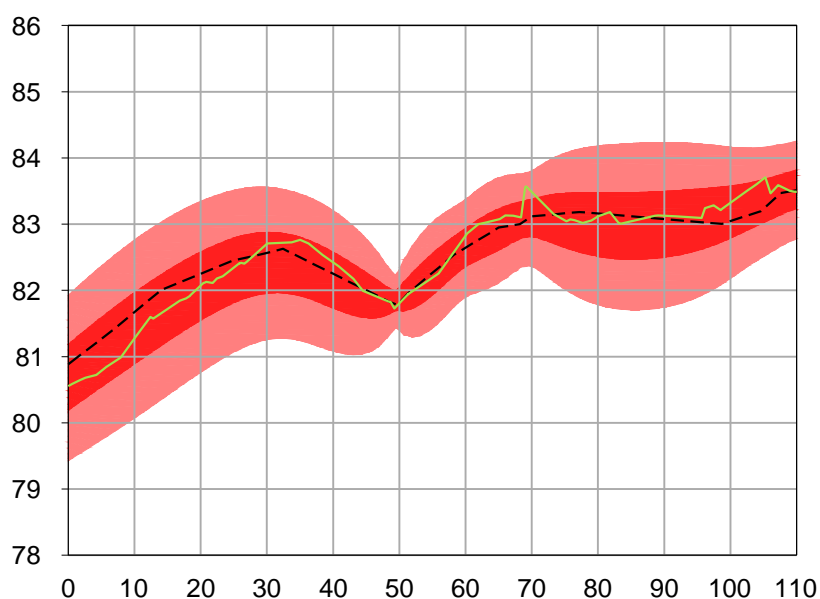
KUVA 10. Painokairausten tiettyä puolikierrosten lukumäärää kuvaava rajapinta rajatuna 80 % luotettavuudella.

Työn tutkimusosuuden tuloksista voidaan päätellä, että ainakaan ilman riittävää perehtyneisyyttä kohteeseen ja interpolointimenetelmiin ei interpoloitujen pintamallien avulla ole mahdollista tuottaa luotettavampaa kuvausta mallinnettavasta pinnasta kuin kolmioverkkomallilla. Toisaalta, koska menetelmien väliset erot olivat hyvin pieniä, voidaan tuloksista päätellä myös, että interpoloidun pintamallin luotettavuus ei ole kolmioverkkomallia huonompi. Kolmioverkkomallin luominen on kuitenkin huomattavasti yksinkertaisempaa ja helpommin toistettavissa, jolloin sen käyttö yleisenä pintamallinnusmenetelmänä on perusteltavissa.

Interpolointimenetelmiä käyttämällä pintamalleista saadaan enemmän tilastollista tietoa kuin kolmioverkkomenetelmää käyttämällä. Ilman erityisempää asiantuntemustakin pintamallinnuksessa olisi mahdollista saada hyötyjä käyttämällä molempia menetelmiä. Interpolointimenetelmillä saatuja pintamallien luotettavuutta kuvaavia tietoja voitaisiin käyttää esimerkiksi kolmioverkkomallien rajaamiseen tai luotettavuustiedon muunlaiseen esittämiseen ja hyödyntämiseen suunnitteluohjelmistoissa. Kuvassa 11 on esitetty esimerkkinä kolmioverkkomalli, joka on väritetty kriging-menetelmällä lasketun luotettavuuden mukaan. Kuvassa 12 on esitetty samasta kohteesta leikkaus A-A', jossa on esitetty kolmioverkkomallin profiili mustalla katkoviivalla, laserkeilausaineistosta muodostetun referenssipinnan profiili vihreällä viivalla sekä punaisen sävyillä kriging-menetelmällä lasketut vertailupinnan 70 %:n ja 90 %:n luottamusvälit.



KUVA 11. Kolmioverkko, jossa epäluotettavimmat alueet ovat kuvattu vaaleanpunaisella värillä.



KUVA 12. Leikkauksessa on kuvattu pintamallin 70 %:n ja 90 %:n luottamusväli punaisen sävyillä.

Maaperämalleihin liittyy sekä lähdekirjallisuuden että tehdyn tutkimuksen perusteella hyvin paljon epävarmuustekijöitä. Nykyisillä tutkimusmenetelmillä malleista ei voida tehdä täysin luotettavia, vaan tutkimukset on suunniteltava siten, että suuremmilta riskeiltä vältetään niin yllättävien maaperän olosuhteiden kuin suunnitteluratkaisujenkin osalta. Maaperämalleihin liittyvät epävarmuudet olisi kuitenkin syytä tiedostaa ja esittää, jotta niiden perusteella ei tehtäisi sellaisia päätöksiä, joihin ne eivät tosiasiallisesti anna vastauksia.

Työhön liittyvän tutkimuksen tarkoituksena ei ollut selvittää optimaalisia havaintopistevälejä erilaisiin suunnittelutarpeisiin, vaan selvittää, miten havaintopisteväli vaikuttaa pintamallien luotettavuuteen. Referenssipinnan ja vertailupinnan välisen eron keskiarvo osoittautui huonoksi tavaksi kuvata pintamallien luotettavuutta. Tutkimuksessa käytetyt pintamallit kattoivat suuria alueita, jolloin on todennäköistä, että niistä lasketut keskiarvot pyrkivät lähestymään nollaa. Esimerkiksi, jos tarkastellaan 40 metrin havaintopistevälillä tehdyistä pintamalleista yksittäistä 1 000 m² aluetta, jossa referenssipinnan ja vertailupinnan tilavuusero on suurimmillaan, tulee tilavuuden poikkeamaksi keskiarvon 13 m³ sijasta yli 5 000 m³.

Tutkimus ei ota myöskään kantaa siihen, miten yksittäisten havaintopisteiden tarkkuus vaikuttaa maaperämallin luotettavuuteen. Teoriassa havaintopisteiden tarkkuuden vaikutusta saattaisi olla mahdollista tutkia toteutuneista hankkeista saatujen aineistojen avulla, mutta koska yksittäisten pisteiden tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä on niin paljon, olisi tutkimus käytännössä hyvin hankala toteuttaa. Mikäli havaintopisteiden epävarmuustekijät ja niiden vaikutus havaintopisteen tarkkuuteen ovat tiedossa, ne voidaan huomioida mallissa. Useinkaan näin ei oletettavasti ole, vaan havaintopisteiden tarkkuus on tuntematon. Tällaisissa tapauksissa havaintopisteiden vaikutusta maaperämallin kokonaisluotettavuuteen voisi olla mahdollista tutkia esimerkiksi Monte Carlo -simulaation avulla.

Kalliopinnan spatiaalisen vaihtelun tutkiminen laajalla alueella ei anna kovinkaan paljon tietoa esimerkiksi arvioitaessa havaintopisteväliä, jolla yksittäisessä kohteessa saataisiin tuotettua luotettava kalliopintamalli. Tutkimuksessa käytettyjä analyysejä automatisoimalla pystyttäisiin mahdollisesti käsittelemään koko Suomen kattava aineisto, jonka tulokset voitaisiin esittää alueittain. Näin olisi mahdollista tuottaa tietoa, jota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi hankkeiden tutkimussuunnittelussa ja määrälaskentaan liittyvien riskien arvioimisessa. Tutkimuksen tuloksia kalliopinnan spatiaalisen vaihtelun osalta voisi sen sijaan käyttää esimerkiksi kuvan 12 kaltaisessa tarkastelussa siten, että pintamallin luottamusväliä arvioitaisiin geostatististen interpolointimenetelmien sijasta käyttämällä tutkimuksesta saatuja tunnuslukuja.

LÄHTEET

- Antikainen, H. & Kortsalo, P. 2012. Johdatus ArcGIS 10 -ohjelmiston käyttöön. Oulun yliopiston maantieteen laitoksen opetusmoniste no. 42. Luettu 17.3.2017. https://noppa oulu.fi/noppa/kurssi/790101p/materiaali/790101P_johdatus_arcgis_10-ohjelmiston_kayttoon.pdf
- Autodesk. 2016. About Calculating Volumes With the Volumes Dashboard. Luettu 11.2.2017. <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-civil-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Civil3D-UserGuide/files/GUID-26A55C03-FD0B-418A-AA96-15054B54D347-htm.html>
- Autodesk. 2017. AutoCAD Civil 3D. Luettu 17.3.2017. <http://www.autodesk.fi/products/autocad-civil-3d/features/all>
- Burrough, P. & McDonnell, R. 1998. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. London: Oxford University Press.
- Burrough, P. 1983. Multiscale sources of spatial variation in soil. II. A non-Brownian fractal model and its application in soil survey. Journal of Soil Science 34, 599–620.
- C Tech. 2016. Earth Volume Studio. Luettu 17.3.2017. <http://www.ctech.com/products/earth-volumetric-studio/>
- C Tech. 2016. Module Library Reference - krig_2d. Luettu 28.2.2017. http://studio-help.ctech.com/Default.htm#module_library/krig_2d.htm
- Esri. 2015. Independent Report Highlights Esri as Leader in Global GIS Market. Luettu 17.3.2017. <http://www.esri.com/esri-news/releases/15-1qtr/independent-report-highlights-esri-as-leader-in-global-gis-market>
- Geodeettinen laitos. 2009a. N43- ja N60-korkeusjärjestelmien välinen kolmioittainen muunnos. Luettu 4.3.2017. <http://coordtrans.fgi.fi/n43n60.jsp>
- Geodeettinen laitos. 2009b. N60- ja N2000-korkeusjärjestelmien välinen kolmioittainen muunnos. Luettu 4.3.2017. <http://coordtrans.fgi.fi/n60n2000.jsp>
- Global CADD Standards. 2013. Golder Associates
- GTK. 2017a. Painovoimamittaukset maaperän paksuuden määrittämisessä. Luettu 26.4.2017. <http://projects.gtk.fi/maapera/tiedonkeruu/geofysiikka/painovoimamittaukset/>
- GTK. 2017b. Seismiset luotaukset ja muut maastomittaukset. Luettu 26.4.2017. <http://www.gtk.fi/asiantuntijapalvelut/maankaytto/kiviaines/maastomittaukset/index.html>
- Haavisto-Hyvärinen, M. & Kutvonen, H. 2007. Maaperäkartan käyttöopas. Espoo: Geologian tutkimuskeskus (GTK).

Haggrén, H. & Honkavaara, E. 2005. Korkeusmallien tuottaminen. Luettu 28.2.2017.
https://foto.aalto.fi/opetus/220/luennot/8/L8_2005.pdf

Herva, V. 2009. Using Delaunay Triangulation in Infrastructure Design Software. Helsingin yliopisto. Tietotekniikan laitos. Diplomityö.

Jaksa, M.B., Goldsworthy, J.S., Fenton, G.A., Kaggwa, W.S., Griffiths, D.V., Kuo, Y.I. & Poulos, H.G. 2005. Towards reliable and effective site investigations. *Geotechnique*, vol. 55, 109–121.

Janhunen, M., Pienimäki, M. & Parantala, S. 2015. Yleiset inframallivaatimukset YIV 2015. Osa 4: Inframalli ja mallinnus hankkeen eri suunnitteluvaiheissa. Helsinki: buildingSMART Finland (bSF).

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka.

Kessler, H., Turner, A.K., Culshaw, M., Royse, K. 2008. Unlocking the potential of digital 3D geological subsurface models for geotechnical engineers. European conference of the International Association for Engineering geology 15. –20.9. 2008. Madrid. Asociación Española de Geología Aplicada a la Ingeniería.

Koivulehto, L. 2016. 3D-maaperämallinnus hydrogeologisessa tutkimuksessa – esimerkkinä Kulopalokankaan pohjavesialue Äänekoskella. Helsingin yliopisto. Geotieteiden ja maantieteen laitos. Pro gradu -tutkielma.

Kuusela-Lahtinen, A. & Vahanne, P. 2005. Maaperän heterogeenisuuden vaikutus haitta-aineiden kulkeutumiseen pilaantuneiden maiden riskinarvioinnissa. Espoo: VTT.

Kvartsberg, S. 2013. Review of the Use of Engineering Geological Information and Design Methods in Underground Rock Construction. Gothenburg: Chalmers University of Technology.

Laine, E-L. 2010. Geologisen 3D-paikkatiedon hallinta. *Positio-lehti* 1/2010, 16–17.

Lepistö, J., Westerholm, H., Schultz, E., Uljas, J. & Björklöf, K. 2014. Hyvät käytännöt pilaantuneiden maiden kenttätutkimuksissa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus (SYKE).

Liikennevirasto. 2014. Taitorakenteiden suunnittelun lähtötieto-ohje. Luettu 26.2.2017.
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lo_2014-21_taitorakenteiden_suunnittelun_web.pdf

Liikennevirasto. 2015. Geotekniset tutkimukset ja mittaukset. Helsinki: Liikennevirasto.

Lindsberg, E., Valpola, S., Valjus, T. & Okkonen, J. 2014. Lestijärven Syrinharjun pohjavesialueen geologisen rakenteen selvitys. Kokkola: Geologian tutkimuskeskus (GTK).

Liukas, J. & Kemppainen, L. 2015. Yleiset inframallivaatimukset YIV 2015. Osa 2: Yleiset mallinnusvaatimukset. Helsinki: buildingSMART Finland (bSF).

Liukas, J. & Virtanen, J. 2015. Yleiset inframallivaatimukset YIV 2015. Osa 3: Lähtötiedot. Helsinki: buildingSMART Finland (bSF).

Maanmittauslaitos. 2017. Laserkeilausaineisto. Luettu 7.3.2016. <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/laserkeilausaineisto>

Mansikkamäki, J. 2009. Olemassa olevien ratapenkereiden stabiliteetin laskenta elementtimenetelmällä. Helsinki: Ratahallintokeskus.

Mäkinen, T. 2013. Maatutkaluotausraportti. Tuusula: Geo-Work Oy.

Paalijärvi, M. 2009. Maatutkaluotaus Jämijärven Lauttakankaalla 17.9.2009. Kokkola: Geologian tutkimuskeskus (GTK).

RakMK B3. 2004. Pohjarakenteet. Määräykset ja ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Rantanen, T., Patjas, E. & Arkima, O. 2007. Tarjouspyyntövaiheen pohjatutkimusten ja tierakenteiden selvitysten määrän ja laadun optimointi ST –urakoissa. Helsinki: Tiehallinto.

RIL. 2005. RIL 121-2004 Pohjarakennusohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Roberts, R & Medley, D. 2016. Civil 3D for Project Managers. Design Training Expo. Luettu 31.3.2017. <http://www.fdot.gov/design/training/DesignExpo/2016/Presentations/Civil3DforFDOTProjectManagers-DougMedleyRandyRoberts.pdf>

Ronkanen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Ruuti, S., Janhunen, M. & Pienimäki, M. 2015. Yleiset inframallivaatimukset YIV 2015. Osa 9: Määrälaskenta ja kustannusarviot. Helsinki: buildingSMART Finland (bSF).

Selin, R. 2001. Ihmeellinen maailma. Luettu 17.3.2017. <http://www.skepsis.fi/ihmeellinen/malli.html>

Seppälä, M. & Tuominen, S. 2005. Pohjaveden virtauksen mallintaminen. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

SGY. 1983. TPO-1983: Talonrakennuksen pohjatutkimusohjeet. Helsinki: Rakentajain kustannus Oy.

SGY. 2015. Infra –pohjatutkimusformaatti versio 2.3. Helsinki: Suomen Geoteknillinen Yhdistys (SGY).

Suomen Vesiyhdistys. 2005. Pohjavesitutkimusopas. Vammala: Suomen Vesiyhdistys r.y.

Stanford University Libraries. 2017. Best practices for file formats. Stanford University. Luettu 30.3.2017. <https://library.stanford.edu/research/data-management-services/data-best-practices/best-practices-file-formats>

The Institution of Civil Engineers. 1991. Inadequate site investigation. Thomas Telford: London.

Tokola, T. & Kalliovirta, J. 2003. Paikkatietoanalyysi. Helsinki: Yliopistopaino.

Trimble. 2009. Kolmioverkko. Luettu 28.2.2017. http://help.nova-point.com/doku.php?id=fi:np:base:menu:terrain_model:triangle_model_and_contour

Törnqvist, J., Laaksonen, R. & Juvankoski, M. 2001. Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Luettu 8.2.2017. <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/9-vastusluotaus.pdf>

VTT. 2003. Inframodel Loppuraportti - Yhteenveto. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Luettu 28.2.2017. http://cic.vtt.fi/projects/inframodel/Documents/infraModel_Yhteenveto_2004-01-23.pdf

Äijälä, A. 1993. Todennäköisyyslaskenta ja tilastotiede. Tampere: Tammertekniikka.